

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Simulación y diseño del prototipo de
un vehículo autobalanceado**

MEMORIA

Autores: Jeroni Alsina Esquena y Marc Pérez Nicolau

Director: Emilio Angulo Navarro

Convocatoria: Enero 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En los últimos tiempos la implementación de los vehículos de transporte unipersonal ha ido en aumento en la sociedad. Su sencillez y flexibilidad de uso hacen de ellos incluso una mejor opción que los coches o las motocicletas para desplazamientos cortos, además de tener a su favor un menor consumo respecto a estos últimos para un mismo viaje.

Entre los transportes unipersonales, el vehículo unipersonal autobalanceado tipo segway es el más común de ellos. Este tipo de vehículo consiste en una plataforma con una o dos ruedas que permite a su usuario desplazarse hacia la dirección en la que incline su peso, manteniéndolo a su vez equilibrado en una posición vertical.

Este proyecto se centra en el análisis tecnológico y del mercado de este tipo de transportes, para posteriormente realizar un estudio detallado a través del diseño de un prototipo simplificado y su posterior simulación de funcionamiento haciendo especial hincapié en el sistema de equilibrado del usuario. El objetivo principal de este proyecto es que mediante los conocimientos adquiridos en este campo se diseñe un prototipo que pueda llegar a servir como modelo de aprendizaje para esta clase de vehículos de transporte.

Con tal de diseñar el prototipo, en primer lugar se ha estudiado los vehículos unipersonales autobalanceados existentes en el mercado para posteriormente proponer un vehículo sencillo con el menor número de componentes posibles, reduciendo así su complejidad a la vez que respetando en todo momento las funcionalidades principales de un vehículo autobalanceado. Con este propósito se ha optado por diseñar un prototipo propulsado por 2 motores *hub* y evitando así el uso de engranajes complejos para la transmisión.

Con el fin de analizar el vehículo, a partir del planteamiento de las ecuaciones del problema matemático del vehículo se realiza una simulación de funcionamiento. Posteriormente se representa en una hoja de cálculo la solución del equilibrado del sistema mediante el diseño de un controlador PID. Siguiendo el mismo proceder, se realiza una simulación del consumo del prototipo en llano para determinar la autonomía teórica del vehículo.

Paralelamente se diseña, mediante el programa de diseño asistido por ordenador SolidWorks 2018, un concepto de prototipo a partir de la unión de piezas sencillas con la clara intención de facilitar su entendimiento así como su futurible construcción. A continuación, se realiza un estudio de la base con elementos finitos para comprobar que el diseño puede soportar las cargas de trabajo.

1. Sumario

RESUMEN	1
1. SUMARIO	3
2. INTRODUCCIÓN	5
2.1. Objeto del proyecto	5
2.2. Alcance del proyecto	5
2.3. Justificación	6
3. ESTADO DEL ARTE	7
3.1. Historia	7
3.2. Análisis del mercado actual	8
3.2.1. Plataforma autobalanceada de dos ruedas paralelas y manillar alto.	8
3.2.2. Plataforma autobalanceada de dos ruedas paralelas y manillar bajo.	10
3.2.3. Vehículo autobalanceado de una sola rueda.....	10
3.2.4. Tabla autobalanceada (Hooboard).....	12
3.2.5. Patines autobalanceados.....	12
3.3. Tecnologías	13
3.3.1. Sistema de equilibrado.....	14
3.3.2. Dirección asistida.....	16
3.3.3. Baterías	17
3.3.4. Motores	19
3.3.5. Control del motor: circuito electrónico del puente en H.....	21
3.3.6. Transmisión mecánica del motor: la caja de engranajes.....	23
4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	27
4.1. Elección del motor: QS Single Shaft Motor <i>hub</i> 205	29
5. SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN VEHÍCULO	
AUTOBALANCEADO	33
5.1. Modelo matemático de un vehículo autobalanceado	34
5.2. Restricciones físicas al modelo	40
5.3. Diseño controlador PID.....	43
5.4. Explicación funcionamiento del prototipo	50
5.5. Adaptación del motor a nuestras especificaciones	54
5.6. Cálculo consumo del prototipo.....	58

6. DISEÑO DETALLADO DEL PROTOTIPO	65
6.1. Diseño asistido por ordenador del prototipo	65
6.1.1. La base del vehículo	66
6.1.2. Análisis de la base mediante el cálculo por elementos finitos	73
6.1.3. Uniones para la base del prototipo	76
6.1.4. La plataforma para los pies	77
6.1.5. El manillar.....	78
6.1.6. El motor <i>hub</i>	80
6.1.7. Ensamblaje final	81
7. PLANIFICACIÓN	85
8. IMPACTO AMBIENTAL	87
9. PRESUPUESTO	89
10. CONCLUSIONES	91
11. FUTURAS MEJORAS E IMPLEMENTACIONES	93
12. AGRADECIMIENTOS	95
BIBLIOGRAFÍA	97
Referencias bibliográficas	97
Bibliografía complementaria	98

2. Introducción

2.1. Objeto del proyecto

Este proyecto tiene como objetivo principal entender el funcionamiento de los vehículos unipersonales autobalanceados para posteriormente diseñar un prototipo que pueda ofrecer unas prestaciones similares a las ofrecidas por los vehículos autobalanceados que se pueden encontrar en el mercado. Para conseguirlo, se deberán fijar unas características del vehículo deseado en las que se basará el diseño y la resolución de su problema matemático para realizar la simulación de su comportamiento.

Se busca que el producto resultante pueda llegar a ser el prototipo en el que se base un estudio de este tipo de vehículos. De este modo se pretende que en un futuro se pueda llegar a construir un vehículo autobalanceado funcional basado en el prototipo diseñado en este proyecto.

2.2. Alcance del proyecto

Este proyecto contiene un estudio del mercado actual de los vehículos autobalanceados, donde se analizan sus distintas variantes y las prestaciones que ofrecen, así como los usos para los cuales han sido diseñados cada modelo. Contiene también un análisis de sus diferentes partes y su tecnología de funcionamiento para posteriormente determinar las especificaciones para el diseño del prototipo de este proyecto.

A continuación del estudio e investigación de este tipo de vehículos se realiza una simulación en Excel del comportamiento del vehículo en funcionamiento, además del cálculo de un controlador PID que se encarga del equilibrado del vehículo.

Finalmente, contiene un diseño realizado mediante el programa Solidworks 2018, con el prototipo dividido en distintos módulos y unidos en un ensamblaje. Con el fin de asegurar que la base del prototipo resiste los esfuerzos aplicados, este proyecto incorpora una simulación por el método de los elementos finitos.

A continuación se enumeran los distintos aspectos a considerarse en este proyecto:

- El modelo de transporte autobalanceado en el que se basa este proyecto es el vehículo de transporte tipo segway de plataforma con dos ruedas paralelas y manillar elevado.

- El diseño pretende ser simple, por lo que únicamente este proyecto se ha centrado en el estudio de las partes más esenciales para su funcionamiento.
- En el diseño, se usan componentes ya comercializados, los cuales son principalmente las baterías y los motores *hub*.
- En la simulación, con tal de simplificar el problema, se ha supuesto únicamente el movimiento en una dirección.

En este proyecto no se diseña la placa base de control del vehículo ni se escogen los sensores necesarios que se utilizarían en una futura construcción. Tampoco se realiza un diseño de la transmisión del vehículo debido al hecho que no es necesaria al escogerse un motor *hub* del mercado el cual no necesita caja de engranajes.

2.3. Justificación

La motivación que nos ha llevado a la realización de este proyecto es nuestro interés por entender mejor cómo funcionan los vehículos autobalanceados tipo segway. Estos vehículos se pueden ver cada vez más frecuentemente, siendo usados como medio de transporte alternativo. Nos parece fascinante la forma en que sus usuarios pueden conducirlo con tanta facilidad y a su vez la libertad de movimiento que éstos ofrecen en comparación con otros vehículos como los coches o las motocicletas. Además, su creciente uso en estos últimos años sugiere que se trata de un mercado en estado de expansión en el que nuevas ideas y variantes de éste tipo de vehículos pueden permitir la obtención de beneficios. Es por ello, que esta clase de vehículos ha despertado en nosotros un gran interés por comprender cómo funcionan y aprovechar los conocimientos adquiridos para idear una posibilidad de negocio futuro en este mercado con el diseño de un modelo simple de vehículo que ofrezca la misma funcionalidad que sus competidores.

3. Estado del arte

Un vehículo unipersonal autobalanceado es un tipo de transporte que puede poseer una o dos ruedas y que controla su balanceo mediante un sistema de control de forma automática. Su fundamento se basa en que el usuario se sitúa encima de una plataforma o base, y gracias al sistema de control y a un conjunto de motores mantienen dicha plataforma siempre horizontal. Para desplazarse, el usuario deberá inclinar su cuerpo ligeramente hacia la dirección que quiera tomar.

3.1. Historia

El concepto de vehículo autoequilibrado fue ideado por el inventor Dean Kamen en el año 2001. Todo empezó cuando Dean Kamen observó a una persona en una silla de ruedas intentando subir una acera. Al observar a esa persona, se dio cuenta que el principal problema de movilidad de esa persona no era su silla de ruedas, sino que el entorno había sido diseñado para usuarios que puedan mantener el equilibrio. Ante esto, Dean Kamen y su equipo investigaron y diseñaron un primer sistema de movilidad autoequilibrado que permitiera a su usuario moverse por terrenos desbalanceados como escaleras o superficies irregulares. Este producto fue el Independence IBOT MobilitySystem.



Ilustración 3.1: El independence IBOT MobilitySystem. Fuente:

https://www.csee.umbc.edu/courses/undergraduate/CMSC391/summer04/burt/blackboardFiles/applications/FKaufman_AppReport

En un principio este invento sólo servía para aquellas personas con movilidad reducida, pero gracias a esa idea más adelante se pensó en si era posible diseñar una máquina que mejorara las capacidades de las personas con movilidad completa, haciendo que pudieran moverse más rápido y cargar más peso todo ello con menor esfuerzo. Es así como surgió el primer concepto de vehículo autobalanceado que recibió el nombre de *Segway Personal Transporter*. De ese modo, ya en el año 2002, la empresa Segway Inc. estaba comercializando los primeros Segway. En un principio, la demanda de este tipo de vehículos de transporte unipersonal fue baja debido a su alto precio, que rondaba entre los 4000 y 5000 dólares, y a cierto defecto detectado en las baterías cuando estaban bajas de carga. Sin embargo, la compañía, continuó su investigación y introdujo mejoras en sus vehículos, haciéndolos más seguros para las demás personas e innovando en su tecnología. En 2015, una empresa china llamada Ninebot también estaba interesada en la investigación y desarrollo de vehículos para desplazamientos cortos, por lo que se fusionó con la empresa norteamericana Segway para formar lo que hoy en día es el principal fabricante de estos transportes, la empresa Ninebot-Segway la cual es resultante de la fusión entre la empresa norteamericana Segway Inc. y su competidora china Ninebot.

Ante una nueva área donde poder innovar, en los últimos 18 años han sido inventados una gran cantidad de variantes de los primeros vehículos tipo Segway, con características y prestaciones variadas en cada modelo.

3.2. Análisis del mercado actual

Actualmente existe una gran variedad de modelos, con características y usos distintos. Si bien difieren en muchos aspectos, la tecnología usada para su funcionamiento es la misma. A continuación se muestran los tipos más comunes de vehículos autobalanceados a día de hoy. Existen una gran variedad de modelos y fabricantes, por lo que se estudiarán los modelos más destacados de cada categoría.

3.2.1. Plataforma autobalanceada de dos ruedas paralelas y manillar alto.

Este vehículo tipo segway sigue la forma de los primeros que se inventaron. De ahora en adelante, nos referiremos a este modelo como el segway clásico. Consiste en una base rectangular fija donde se apoyan los pies, en la cual está unido a ella un manillar de una longitud variable y dos ruedas paralelas con motores independientes. El usuario, mediante el uso de su propio peso puede avanzar o retroceder, o inclinar el manillar hacia uno de los lados para cambiar de dirección o girar sobre sí mismo.



Ilustración 3.2: Imágenes de los modelos Segway i2 SE; Segway x2 SE y Segway E+, de izquierda a derecha. Fuente: <http://es-es.Segway.com>

Las prestaciones del segway clásico pueden variar en función del modelo, pero presentan valores parecidos tal y como se muestra en la siguiente tabla:

	Segway i2 SE	Segway x2 SE	Segway E+
Máx. Velocidad	20 km/h	20 km/h	20 km/h
Masa neta	47,4 kg	54,7 kg	23,5 kg
Energía de la batería	382 Wh	382 Wh	620 Wh
Máx. pendiente	20 grados	20 grados	20 grados
Masa máxima soportada	117 kg (min. 45 kg)	117 kg (min. 45kg)	110 kg
Potencia de salida	2000Wx2	2000Wx2	1750Wx2
Autonomía	38 km	23 km	30 km
Tiempo de carga máximo	12 horas	12 horas	5 horas
Indicado para	Uso industrial para almacenes e interiores	Todoterreno	Ciudad (portabilidad)
Precio orientativo	8820€	9425€	1650€

Tabla 3.3.1: Tabla comparativa de las prestaciones de los distintos modelos de segway Clásico. Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla 3.1, estos modelos difieren en lo que respecta sus prestaciones, pero a su vez esta variedad de vehículos permite un amplio espejo de usos, desde el uso industrial para los operarios en almacenes, hasta el uso lúdico como el senderismo.

En la tabla 3.1, la sección de potencia de salida está expresada en forma de la potencia suministrada por cada motor (1 en cada rueda). Por este motivo que se ha formulado con la notación de (x2).

3.2.2. Plataforma autobalanceada de dos ruedas paralelas y manillar bajo.

Esta variante del segway clásico, la cual tiene la misma distribución de componentes, se diferencia en el hecho que su base es más pequeña y no posee un manillar extensible como si ocurre con el segway clásico. En su lugar, el manillar está diseñado para que actúe como una zona de apoyo lateral para las rodillas del usuario. La forma de controlarlo es inclinar el cuerpo hacia donde se pretenda ir y el segway tomará la dirección escogida. Dos ejemplos de dichos modelos son el Segway miniPRO y el Segway miniPLUS.



Ilustración 3.3: A la izquierda de la foto se muestra el Segway miniPRO y a su derecha, el Segway miniPLUS. Fuente: <http://es-es.Segway.com>

	Segway miniPRO	Segway miniPLUS
Máx. Velocidad	18 km/h	20 km/h
Masa neta	12,8 kg	16,3 kg
Energía de la batería	310 Wh	329 Wh
Máx. pendiente	15 grados	15 grados
Masa máxima soportada	100 kg	100 kg
Potencia de salida	400Wx2	400Wx2
Autonomía	30 km	35 km
Tiempo de carga máximo	4 horas	4 horas
Indicado para	Ciudad	Ciudad
Precio orientativo	545€	800€

Tabla 3.2: Tabla comparativa de las prestaciones de los 2 modelos de segway mini. Fuente: elaboración propia.

En comparación con el segway clásico, este es mucho más ligero, pero su uso está limitado a terrenos más regulares. Las potencias de sus motores son más bajas, y en consecuencia, no puede afrontar grandes pendientes. Por otro lado, este modelo está tan enfocado al uso lúdico como al transporte en sí.

3.2.3. Vehículo autobalanceado de una sola rueda

Esta clase de vehículos difiere bastante por lo que respecta en su estructura del resto. En este caso solo hay una rueda y la base está construida alrededor de ella en forma de carcasa de la

rueda, conteniendo en su interior el sistema de control para balancear el dispositivo. Hay dos puntos de apoyo de pequeña superficie del tamaño de un pedal, los cuales son desplegados, que permiten al usuario colocar sus pies de modo que la rueda quede sujeta entre las dos piernas. Para desplazarse, el usuario deberá inclinar su peso ligeramente hacia adelante o hacia atrás en caso de querer retroceder, y para girar deberá inclinarse un poco hacia el lado deseado. Los dos ejemplos más notables de este tipo son los modelos Ninebot ONE E+ y Ninebot Z10.



Ilustración 3.4: Vehículos autobalanceados de una sola rueda. A la izquierda el Ninebot ONE E+, a la derecha, el Ninebot Z10. Fuente: <http://es-es.Segway.com>

Este vehículo es el más ligero de los todos los modelos de vehículos autobalanceados y es a la vez el que está en más auge en la actualidad. Es usado tanto con fines lúdicos como para el desplazamiento de un lugar a otro, especialmente en las zonas urbanizadas. Es tan ligero y pequeño que puede llevarse con una mano. Aunque las características de este dispositivo sean muy ventajosas, su principal inconveniente es que al disponer de una sola rueda, no podrá realizar giros muy cerrados sin comprometer la estabilidad del usuario. Tampoco puede girar sobre sí mismo como sí pueden hacer los segway típicos de dos ruedas. Las prestaciones de estos dos modelos se muestran a continuación:

	Ninebot ONE E+	Ninebot Z10
Máx. Velocidad	24 km/h	45 km/h
Masa neta	11,4 kg	24 kg
Energía de la batería	310 Wh	995 Wh
Máx. pendiente	15 grados	25 grados
Masa máxima soportada	120 kg	150 kg
Potencia de salida	500W	1800 W
Autonomía	30 km	90 km
Tiempo de carga máximo	3 horas	10,5 horas
Indicado para	Ciudad	Todoterreno
Precio orientativo	800€	1500€

Tabla 3.3: Características de los 2 modelos de la empresa Segway, Inc de una sola rueda más representativos. Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Tabla autobalanceada (Hooboard)

Las tablas autobalanceadas son un derivado del segway clásico. En este caso es otra compañía llamada Hooboard quien las diseña y comercializa. Este vehículo autobalanceado consiste en dos plataformas donde la persona coloca los pies, que controlan cada rueda. Estas dos plataformas están unidas en un mismo soporte, pero las ruedas funcionan de forma independiente. El usuario coloca un pie en cada plataforma y mediante la combinación de la inclinación de ambos pies se pueden conseguir desplazamientos diversos. Para avanzar es suficiente inclinar ambos pies hacia delante. Para retroceder, solamente se deben inclinar los pies hacia atrás. Si se pretende girar mientras se está avanzando hay que inclinar ambos pies hacia adelante, pero con distintas inclinaciones, inclinando más el pie hacia la dirección que se vaya a tomar.



Ilustración 3.5: Tablas autobalanceadas. A la izquierda, el modelo Hooboard Classic. A la derecha el modelo Hooboard Sport. Ambos de la empresa Hooboard. Fuente: <https://www.hooboard.com>

A continuación se adjunta una tabla comparativa con los 2 modelos de tablas autobalanceadas de la empresa Hooboard:

	Hooboard Classic	Hooboard Sport
Máx. Velocidad	20 km/h	15 km/h
Masa neta	12 kg	14 kg
Energía de la batería	144 Wh	162,8 Wh
Máx. pendiente	15 grados	15 grados
Masa máxima soportada	120 kg	120 kg
Potencia de salida	350Wx2	400Wx2
Autonomía	15 km	15 km
Tiempo de carga máximo	4 horas	2,5-3 horas
Indicado para	Ciudad	Todoterreno
Precio orientativo	170€	450€

Tabla 3.3: Características de los dos modelos actuales de Tablas autobalanceadas. Fuente: elaboración propia.

3.2.5. Patines autobalanceados

Este derivado de los vehículos autobalanceados es el producto más reciente y todavía está en pruebas. Consiste en dos patines de una sola rueda e independientes el uno del otro. El usuario coloca un pie en cada patín y para avanzar o retroceder, se inclina hacia delante o hacia atrás. Para girar en marcha, hay que inclinar más un pie que otro y para girar sobre sí mismo hay que inclinar un

pie hacia adelante y otro hacia atrás. Este producto es único de la empresa Segway.Inc, y recibe el nombre de segway Drifts



Ilustración 3.6: SegwayDrifts. Fuente: <http://es-es.Segway.com>

A continuación se muestran las prestaciones de este nuevo concepto:

	Segway Drift W1
Máx. Velocidad	12 km/h
Masa neta	3,5 kg (cada e-Skate)
Energía de la batería	44.4 Wh
Máx. pendiente	10 grados
Masa soportada	10 - 100 kg
Potencia de salida	37,5 W
Tiempo de conducción	45 min
Tiempo de carga máximo	3 horas
Precio orientativo	400€

Tabla 3.3.4: Características del Segway Drift. Fuente: elaboración propia.

3.3. Tecnologías

Una vez realizado el estudio del mercado actual de los vehículos autobalanceados, se ha procedido a analizar el funcionamiento de este tipo de vehículos así como la tecnología involucrada. Si bien existen en el mercado actual una gran variedad de modelos de distintos fabricantes, todos ellos funcionan bajo el mismo principio de equilibrio mediante ordenador. Para nuestro caso en concreto nos hemos centrado en el segway clásico.

Un vehículo autobalanceado funciona de la siguiente manera. Cuando el usuario está subido en él, si desea desplazarse hacia adelante, deberá agarrarse al manillar e inclinar ligeramente su cuerpo hacia adelante. Eso hará que el vehículo detecte que el usuario está cayendo hacia adelante y use los motores de las ruedas para avanzar y devolver al usuario a su posición vertical. Si por el contrario, el usuario quiere frenar o retroceder, deberá inclinarse hacia atrás, de forma que el vehículo detectará la inclinación hacia atrás y usará de nuevo los motores de las ruedas para retroceder y devolver al usuario de nuevo a su posición vertical. Si se quiere girar hacia un

lado en marcha, hay que inclinar el manillar hacia el lado que se quiere girar a la vez que se inclina el cuerpo para avanzar o retroceder. Además, también permite girar sobre sí mismo estando detenido inclinando el manillar.

En la siguiente ilustración se muestra un segway clásico desglosado.

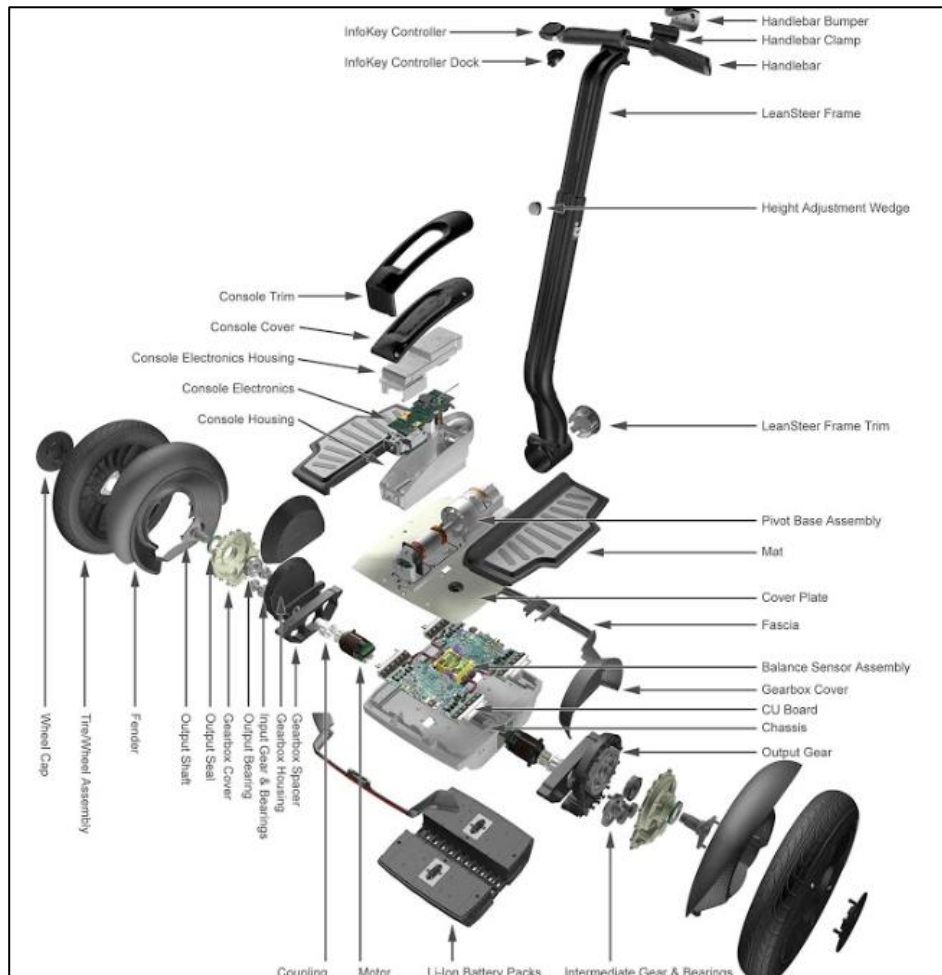


Ilustración 3.7: Desglose del segway clásico. Fuente: Manual de usuario.

Como se puede apreciar, éste se divide en muchas partes y sería difícil abarcarlas todas, por lo que principalmente este estudio se ha centrado en las partes más importantes para su funcionamiento correcto. Éstas son, los sensores giroscópicos, los motores, la transmisión mecánica del motor, el control del motor, las baterías y la dirección asistida.

3.3.1. Sistema de equilibrado.

El concepto principal de un vehículo autoequilibrado es mantener la estabilidad de su usuario en una posición vertical, mediante el movimiento. El funcionamiento se asemeja en gran medida al modelo

de un péndulo invertido, donde el usuario actúa de péndulo, y el segway debe mantenerlo vertical corrigiendo en todo momento cualquier desviación de la posición de equilibrio del usuario.

Para realizar esta tarea, se usan unos dispositivos llamados sensores giroscópicos. Este tipo de sensores consisten en una pequeña capa de silicio montada encima de un cuadro de soporte. Las partículas que conforman la capa vibran gracias al paso de un pequeño corriente electrostático a través de la placa de silicio. Esta situación emula al cuerpo girando sobre el eje principal de inercia. Cuando el cuadro de soporte no sufre ninguna inclinación todas las partículas vibran de una forma predecible para el sensor, por lo que no se detecta ningún cambio en la orientación. En cambio, si el cuadro de soporte de la placa de silicio cambia de orientación, entonces las partículas de la placa de silicio vibrarán de una forma distinta en relación a la placa, lo que generará que la vibración cambie su magnitud de forma proporcional al grado de rotación. Entonces el sensor lee este cambio de vibración y envía la información al controlador en forma de corriente eléctrica.

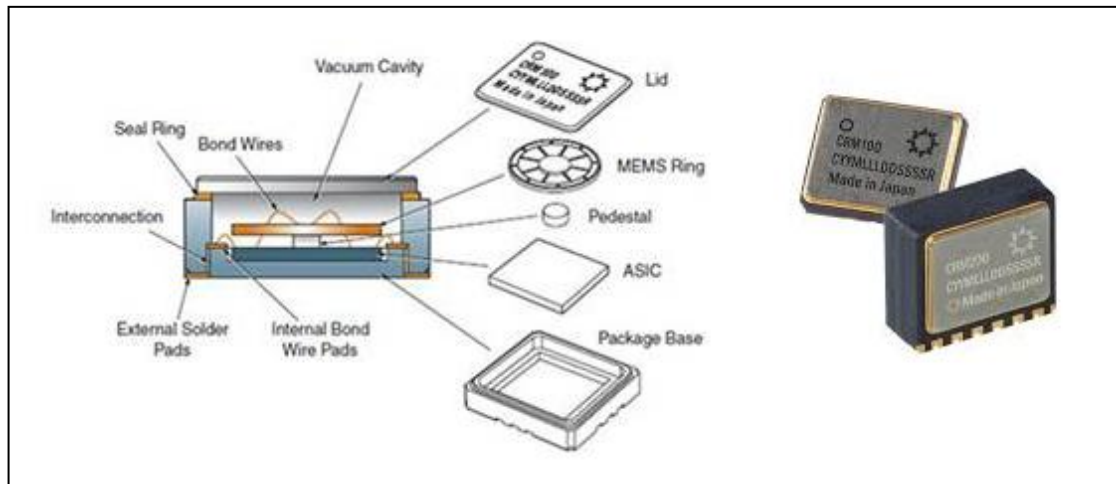


Ilustración 3.8: Sensor giroscópico con placa de silicio. Fuente:

<https://images.marinetechnews.com/images/maritime/w400/pinpoint-crm100-mems-33844.jpg>

Los vehículos autobalanceados contienen 5 sensores como los de la Ilustración 3.8, siendo 3 de ellos necesarios para detectar la inclinación en el plano. Los otros 2 sensores aportan redundancia al sistema, para hacerlo más robusto ante cualquier fallo en algunos de los tres sensores principales.

En el sistema de equilibrado también actúan 2 sensores de inclinación, para detectar cuando se está subiendo o bajando una pendiente. Estos sensores funcionan de una forma similar al oído interno humano. Los sensores contienen un fluido electrolítico mediante el cual, por acción de la gravedad, se puede detectar como de inclinada está la base respecto al suelo llano. De este modo,

cuando el ordenador tenga que efectuar las correcciones para que su usuario se mantenga estable, también considerará el hecho de que el vehículo esté subiendo o bajando una cuesta y podrá, de este modo, mantener al usuario estable.

Toda esta información recopilada por los sensores giroscópicos y los de inclinación se envía a un ordenador que lo traduce a la orientación del vehículo en el espacio, por lo que la compara con la orientación ideal y en función de dicha comparación pone en marcha los motores de las ruedas para mantener la base estabilizada a la vez que se desplaza.

3.3.2. Dirección asistida

La dirección asistida consiste en un sistema de dos piezas que permite que el segway vaya a una dirección determinada. Estas dos piezas son el eje *leansteer* y el sensor *leansteer*.



Ilustración 3.9: A la izquierda, el eje *leansteer*. A la derecha, el sensor *leansteer* y donde va montado en un segway clásico. Fuente: <http://segway-0.shptron.com/p/black-x2-leansteer-frame-and-color-trim-kit>

El eje *leansteer* consiste en una estructura rígida que forma parte del manillar y une la base con el mango del manillar donde el usuario coloca sus manos. El eje *leansteer* se une a la base mediante una estructura que contiene el sensor *leansteer*, que consiste en un potenciómetro.

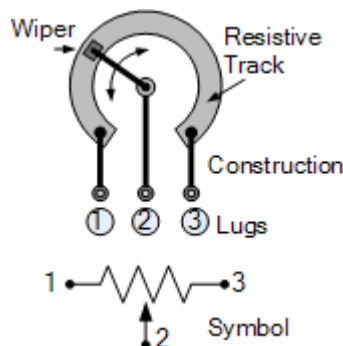


Ilustración 3.10: Representación del potenciómetro en el que consiste el sensor *leansteer* de un segway clásico. Fuente: <https://educarparaelcambio.com/arduino/reto-7-el-potenciometro-un-input-analogico>

Éste varía su resistencia en función de la posición del manillar y mediante el voltaje variable que proporciona el potenciómetro es capaz de detectar el giro del eje *leansteer* y enviar la información al sistema de control para que en consecuencia, controle los motores de tal forma que se obtenga el giro esperado.

3.3.3. Baterías

El sistema de alimentación de un vehículo tipo segway consiste en una o dos baterías unidas a la base de este, y una entrada de corriente donde se conecta el cargador para poder recargar las baterías.

Las baterías pueden variar en tamaño y número en función de los dispositivos del mercado explicados anteriormente, debido a que cada uno requerirá unas necesidades de energía distintos. De todos modos todas las baterías que poseen estos vehículos tienen una estructura parecida, que consiste en un conjunto de celdas electroquímicas conectadas entre sí con tal de conseguir las condiciones de alimentación determinadas. Por ejemplo, en la batería de un segway clásico (modelo i2 o x2) aparece el término 23S4P, el cual significa que la batería final está formada por la unión de 4 ramas en paralelo de 23 celdas conectadas en serie cada una. Cada celda tiene 3,2V y 1500mAh. Al conectar una fila de 23 celdas en serie se obtiene una batería de 73,6V ($3,2V \cdot 23$ celdas) y 1500mAh. Al conectar 4 de estas filas de 23 celdas, se obtiene una batería de 73,6 V y 6000mAh ($1500mAh \cdot 4$ ramas).



Ilustración 3.11: Paquete de celdas de la batería de un segway clásico.

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=B7T9SISua8s>

En dispositivos como los vehículos tipo segway, las baterías empleadas son baterías recargables de ion-litio, en concreto las baterías LiFePO_4 . En el grupo de las baterías recargables también hay las de níquel-metal-hidruro y las de níquel-cadmio, además de las de ion-litio, pero estas últimas son las más usada en la actualidad en los vehículos eléctricos.

Estas baterías, al tener los electrodos fabricados de Litio y carbono, son más ligeras que las de Níquel-cadmio o Níquel-Metal-Hidruro para un mismo tamaño, lo que significa una reducción de peso para el dispositivo en el que se utilicen. Además, el Litio es un elemento que es más reactivo que los otros, lo que quiere decir que una batería de ion-litio de las mismas características que otra batería de distinto material tiene una densidad de energía más alta. Por ejemplo, una batería de ion-litio puede llegar a almacenar $0,150\text{kWh/kg}$, mientras que una misma batería con celdas de níquel-metal-hidruro puede almacenar hasta $0,1\text{kWh/kg}$. Todo esto se traduce en el hecho que para conseguir una misma cantidad de energía suministrada, se requiera menor masa para una batería de ion-litio que para el resto de baterías.

Otra ventaja importante de las baterías de ion-litio es la poca pérdida de carga con el tiempo. Así como las baterías de níquel-metal-hidruro pueden llegar a perder hasta un 20% de su carga inicial, una batería de ion-litio puede perder alrededor de un 5% de su carga por mes.

Además, otra característica a favor de las baterías de ion-litio respecto a las otras tecnologías es el hecho que las baterías de ion-litio no sufren el conocido efecto de memoria, por lo que pueden ser cargadas sin necesidad de que se descarguen completamente antes. El efecto de memoria es la reducción de la capacidad de la batería debido a la realización de cargas incompletas, es decir, cuando se realiza una carga completa de la batería sin haberse descargado antes.

Las baterías de LiFePO_4 o LFP son un tipo de baterías de ion-litio donde el cátodo está hecho de Fosfato de Hierro Litio. Fueron desarrolladas en el año 1996 con el propósito de evitar que la batería se incendiara en caso de haber sido sometida a una sobrecarga accidental. Estas baterías tienen una densidad de energía ligeramente inferior a las baterías de ion-litio LiCoO_2 pero son incombustibles y mucho más seguras. También ofrecen mayor durabilidad por lo que son ampliamente utilizadas en todo tipo de vehículos eléctricos.

El segway clásico (modelos i2 y x2) incorpora actualmente dos baterías de 73,6 V y 6 Ah, y utiliza ambas baterías a la vez. El motivo es añadir redundancia al vehículo, de forma que el tipo de alimentación se adapte a la batería con menor estado de carga. Además, si una de las baterías falla por algún motivo, la otra sigue suministrando energía de forma que pueda seguir funcionando durante un pequeño período de tiempo extra, evitando así que su usuario pueda

sufrir un accidente cuando se produzca el fallo. A su vez, el sistema está programado para que se mande un mensaje al conductor del vehículo a través de una pantalla situada en la parte superior del manillar informando sobre la necesidad de cualquier tipo de operación. Ya sea desde una simple recarga hasta la necesidad de acudir a un taller para una revisión o sustitución de las baterías.

3.3.4. Motores

Los motores encargados de propulsar todos los vehículos tipo segway que actualmente hay en el mercado son motores *brushless*, o sin escobillas, de imanes permanentes. Los motores *brushless* son máquinas eléctricas con un imán permanente en el rotor y bobinas de conductor en el estator, de tres o más fases, las cuales son alimentadas con un conjunto de tensiones polifásicas alternas, que pueden ser sinusoidales o trapezoidales, generadas por medio de un circuito inversor controlado de forma que las características de operación de la máquina eléctrica emule las de un motor DC convencional, es decir, un motor DC con escobillas en lo referente a las relaciones par/corriente y velocidad angular/ voltaje. En el rotor hay una cifra entera de pares de polos magnéticos. Cuantos más polos magnéticos tiene el motor más complicado es el bobinado en el estator. Además, cuanto mayor es el número de polos, mayor es el par que se puede producir pero menor es la velocidad máxima que se puede alcanzar. A continuación se muestra un esquema de un motor *brushless* de un par de polos.

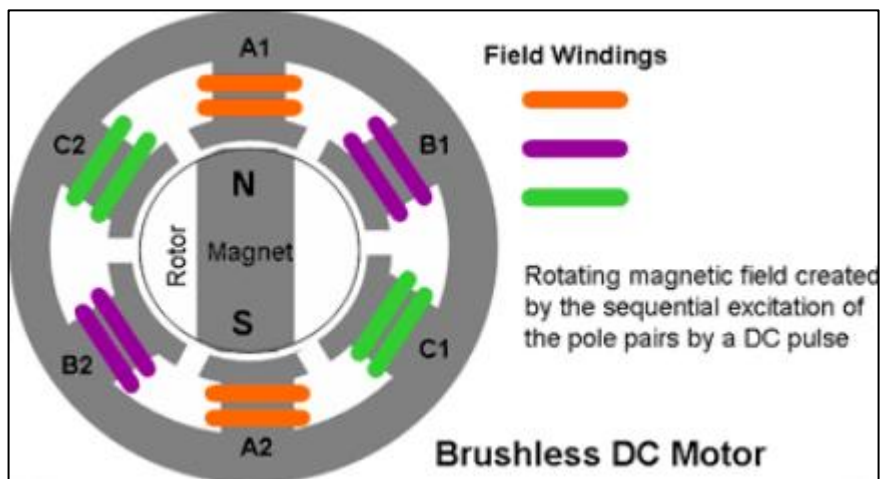


Ilustración 3.12: Esquema del motor *brushless* DC de un par de polos.

Fuente: <https://sites.google.com/site/201602maquinaselectricas/maquinas-electricas/motor-de-corriente-continua/motor-brushless>

Debido a sus características, cada par de polos genera un campo magnético permanente. A su vez, las espiras del estator están conectadas formando un sistema de tres bobinas de forma que se obtiene un circuito trifásico balanceado y simétrico, para cada par de polos. Este sistema de

bobinas se alimenta mediante un sistema de alimentación eléctrica trifásica. Al alimentar dichas bobinas, por cada una de ellas pasa una corriente i_a , i_b e i_c , respectivamente. Entonces se generan las siguientes fuerzas:

$$\begin{aligned}\vec{F}_a(t) &= \frac{N_s}{2} i_a(t) \angle 0^\circ \\ \vec{F}_b(t) &= \frac{N_s}{2} i_b(t) \angle 120^\circ \\ \vec{F}_c(t) &= \frac{N_s}{2} i_c(t) \angle 240^\circ\end{aligned}$$

Mediante la suma vectorial de las tres fuerzas se obtiene la fuerza resultante magnetomotriz la cual es muestra a continuación:

$$\vec{F}_s(t) = \vec{F}_a(t) + \vec{F}_b(t) + \vec{F}_c(t) = \hat{F}_s \angle \theta_s$$

Esta fuerza magnetomotriz F_s provoca que el rotor gire hasta que el campo generado por el imán se queda alineado con el campo generado con las bobinas. De esta forma ambos campos interaccionan produciendo que el rotor se estabilice y gire en sincronismo con el campo del estator.

En adición, la mayoría de los motores de imanes permanentes suelen llevar incorporados un sensor de posición del rotor. Estos motores son conocidos como los *brushless sensored*. Si bien es cierto que existen los motores *brushless sensorless*, los cuales carecen de sensores que indiquen la posición del rotor en cada instante, éstos no se utilizan en la actualidad. La función del sensor en los motores *brushless* es la de leer la posición del rotor en todo momento e informar al controlador interno del motor cuándo se debe alimentar cada bobina del devanado de forma óptima, con tal de realizar la conmutación entre las fases de forma correcta.

Actualmente los motores *brushless* con imanes permanentes son los más usados en la industria de los vehículos eléctricos. Esto es debido a sus principales ventajas respecto a su alternativa, el motor con escobillas.

- El motor *brushless* es más preciso. Esto es debido a que su giro está controlado mediante sensores y ordenador, permitiendo un mayor rango de velocidades más variadas. En el caso de los motores con escobillas, éstas limitan la velocidad máxima del rotor.
- En los motores *brushless* no aparecen chispas ni ruido eléctrico debido a que no tienen escobillas que puedan generarlos.
- Los motores *brushless* tiene una mayor vida útil. En el caso de los motores con escobillas, éstas se desgastan y se pueden deformar produciendo que el contacto ya no sea permanente y el motor no funcione correctamente.

- Al estar ubicados las bobinas en el estator, es más fácil la refrigeración de éstas.
- En los motores *brushless* se puede variar el número de sus bobinas para conseguir un control más preciso del motor. En el caso del motor con escobillas, éstas limitan el número de polos que el motor puede tener.

Como única desventaja para esta clase de motores respecto a su competidor aparece el elevado coste inicial de los motores *brushless* en comparación a los motores con escobillas, los cuales son más simples y menos costosos de fabricar. Sin embargo un motor *brushless* es más eficiente y tiene mayor vida útil por lo que puede compensar su coste.

Por todas las ventajas enumeradas, los motores usados actualmente en todos los vehículos tipo segway son motores *brushless* DC trifásicos.

3.3.5. Control del motor: circuito electrónico del puente en H

Como ya se ha visto, para conseguir equilibrar la base del vehículo, se requiere el uso de 2 motores (uno en cada rueda) para que se activen cuando haya un desequilibrio del sistema y proceden a realizar el equilibrado, produciendo así un avance o retroceso.

Para conseguir alimentar el motor *brushless* DC, dotándole de la posibilidad de girar en ambos sentidos (giro horario y antihorario), se implementa un circuito electrónico conocido como el puente en H. El circuito consiste en un sistema de cuatro interruptores, que pueden ser mecánicos o transistores, conectados de tal forma que recuerda a la forma de la letra H, ubicándose la carga a alimentar en el tramo horizontal de esta letra H y los cuatro interruptores en los extremos de los tramos verticales. El motor, cuyo control va a ser ejercido por este circuito electrónico, es alimentado por la batería.

A continuación se muestra el esquema eléctrico del control por puente en H.

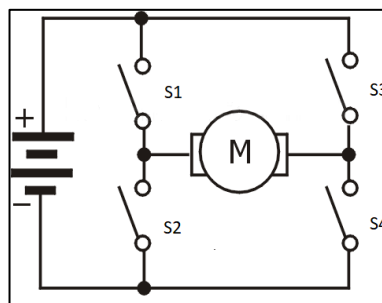


Ilustración 3.13: Esquema del control del motor. Fuente: <https://www.inventable.eu/2017/05/26/funciona-puente-motores-corriente-continua/>

Mediante la combinación de los interruptores, es posible alimentar el motor en ambos sentidos con una corriente continua. En la ilustración 3.14 se muestran las dos configuraciones a través de las cuales el motor puede girar en un sentido u otro. Estas combinaciones se obtienen o cerrando los interruptores S1 y S4 y dejando abiertos S2 y S3, permitiendo que el motor pueda girar en el sentido de las agujas del reloj, o cerrando S2 y S3 y dejando abiertos S1 y S4 de forma que el motor pueda girar en el sentido contrario al de las agujas del reloj.

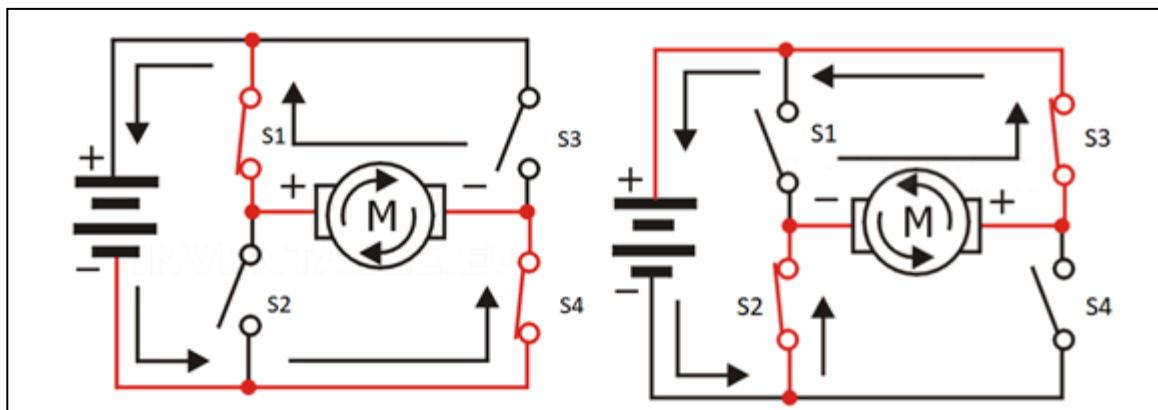


Ilustración 3.14: Configuración de los interruptores para los dos sentidos de giro del motor. Fuente: <https://www.inventable.eu/2017/05/26/funciona-puente-motores-corriente-continua/>

Adicionalmente, implementando este control se pueden conseguir distintos tipos de frenado del motor. En primer lugar, el frenado inercial consiste en dejar los cuatro interruptores abiertos, de forma que el motor no esté alimentado y en consecuencia gire por inercia hasta detenerse. El otro tipo de frenado consiste en conectar los interruptores de forma opuesta a como estaban previamente. Por ejemplo, si el motor está girando en sentido horario, es decir, con S1 y S4 cerrados y S2 y S3 abiertos, si queremos frenarlo rápidamente solamente es necesario abrir S1 y S4 y cerrar S2 y S3 y viceversa.

Sin embargo, no todas las combinaciones de los interruptores son posibles. No se pueden cerrar los interruptores S1 y S2 a la vez, ni tampoco S3 y S4, ni los cuatro a la vez ya que se crearía un cortocircuito y podría estropear la fuente de alimentación.

En el caso de los vehículos tipo segway se usan transistores BJT los cuales hacen la función de interruptor. La ventaja respecto a los interruptores mecánicos es que no precisan de elementos físicos que intervengan en la activación o desactivación del interruptor. También, permite controlar dichos transistores mediante ordenador, consiguiendo así un control más preciso del motor.

Sin embargo, dado que el motor *brushless* DC se debe alimentar con una corriente alterna trifásica, se requiere un control con puente en H para las tres fases, por lo que el circuito resulta ser el siguiente:

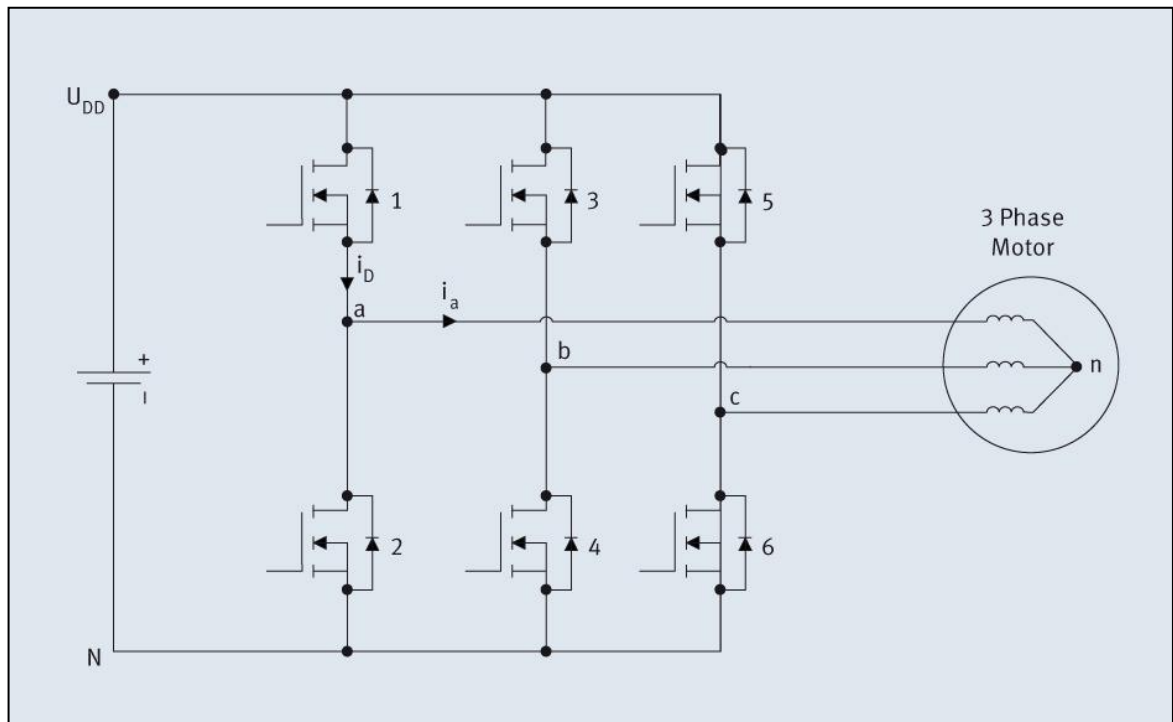


Ilustración 3.15: Esquema eléctrico del circuito de control del puente en H para una carga trifásica usando transistores BJT de unión NPN. Fuente: <https://hackaday.io/project/3176-gator-quad/log/11053-bldc-motor-and-controller-theory>

3.3.6. Transmisión mecánica del motor: la caja de engranajes

La caja de engranajes consiste en un conjunto de engranajes de distintas relaciones de transmisión mediante los cuales se transmite el movimiento del motor a las ruedas. Estos engranajes están confinados herméticamente en una caja metálica que evita que agentes externos puedan afectar a su correcto funcionamiento.

La caja de engranajes está situada paralela a las ruedas, de forma que su eje de entrada y su eje de salida puedan acoplarse al eje del motor y de las ruedas respectivamente.

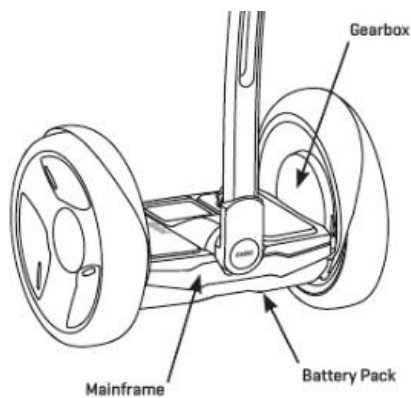


Ilustración 3.16. La ubicación de la caja de engranajes. Fuentes: <https://fccid.io/T2Z-RK01/User-Manual/Users-Manual-2944717>; <http://www.pt-repairs.co.uk/wp-content/uploads/2016/03/Segway-Gear-Box-300x197.jpg>

El conjunto de engranajes está fabricado de aceros de media aleación, que son aceros al manganeso, y su denominación según la Society of Automotive Engineers (SAE) es del tipo SAE 15XX, donde el porcentaje de Mn varía entre 1,20 y 1,65, según el porcentaje de C. Los aceros más típicos de este tipo son:

- SAE 1524: Aceros con un contenido en porcentaje de manganeso comprendido en el rango de 1,20% y 1,50%. Son empleados para la construcción de engranajes.
- SAE 1542: Aceros con un contenido entre el 1,35% y el 1,65% de manganeso. Son empleados para el temple.

La caja de engranajes permite una transmisión a dos tiempos, es decir, a través de dos relaciones de transmisión. La primera relación consiste en una reducción con la relación de transmisión de 15/68 y la segunda es otra reducción de 17/91, de forma que se consigue una relación de transmisión equivalente de 1/24, como se indica en la siguiente imagen.

Como se puede apreciar en la ilustración que se muestra a continuación, las relaciones de transmisión son números con multitud de decimales y están diseñadas de esta forma para que la zona de contacto entre dos dientes sea diferente a cada ciclo, permitiendo alargar la vida útil de los engranajes. Además, los engranajes de esta caja de engranajes son helicoidales para conseguir una menor cantidad de ruido.

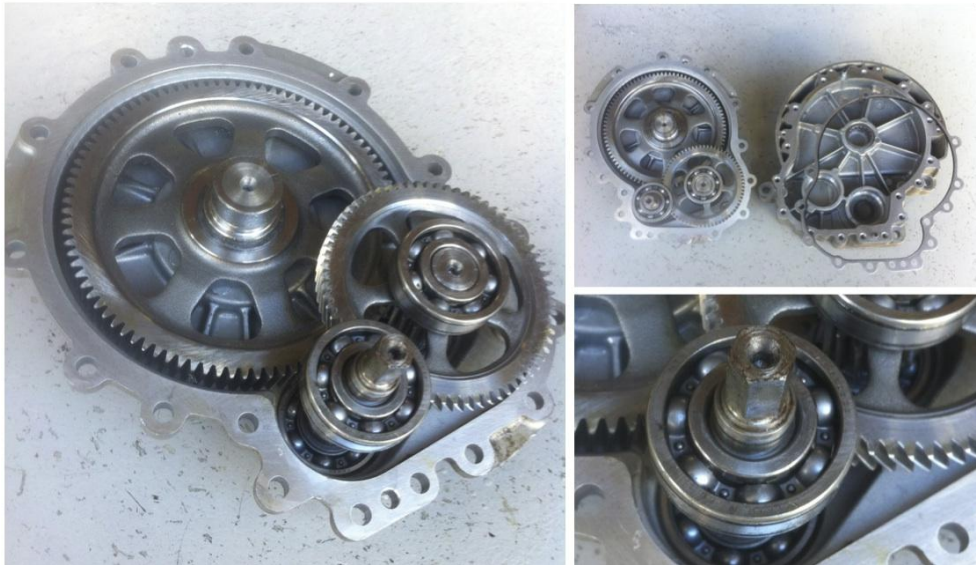


Ilustración 3.17: Caja de engranajes del Segway i2 donde se puede observar la relación de transmisión a dos tiempos entre el motor y la rueda. Fuente: <https://Segwaynz.wordpress.com>

En adición, las relaciones de transmisión están diseñadas para que con las distintas velocidades de giro de los motores, se consigan los armónicos de do menor, de forma que, según el propio fabricante Ninebot-Segway Inc., emita un tono agradable para el usuario.

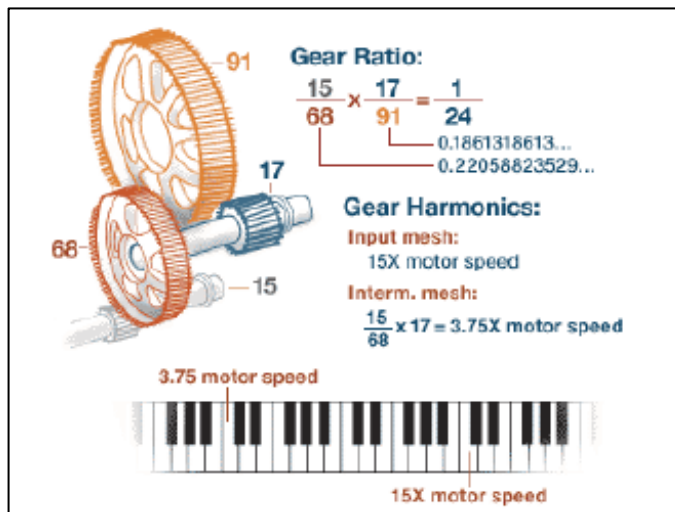


Ilustración 3.18: Las relaciones de transmisión del Segway están pensadas para conseguir un sonido que coincida con un armónico del Do menor, emitiendo un sonido agradable.

Fuente: <https://Segwaynz.wordpress.com>

Además del sonido característico que produce, descrito por el fabricante como “agradable”, éste también sirve como indicador de si la caja de engranajes está en perfecto estado o está dañada.

Es principalmente por este motivo que el sonido que producen los engranajes está tan cuidadosamente diseñado. Por lo general, las cajas de engranajes de estos vehículos se vuelven ruidosas a causa del desgaste a partir de los 30.000 km recorridos, a partir de los cuales ya se denota una pérdida de prestaciones del vehículo debido a estos daños. Raramente las cajas de cambios empiezan a volverse ruidosas pasados los 10.000 km de uso y se es el caso se debe principalmente al hecho que han sido usadas en condiciones agresivas de trabajo.

4. Especificaciones técnicas

Una vez estudiado el estado del arte en el campo de los vehículos autoequilibrados y habiéndose observado toda la gama de este tipo de transportes existentes en el mercado con sus pertinentes prestaciones se ha acordado para el diseño del primer prototipo de vehículo autobalanceado con motores *hub* las prestaciones que se detallan a continuación.

Modelo	Segway <i>hub</i> 1.0
Máx. Velocidad	30 km/h
Masa neta prototipo	55 kg
Energía de la batería	382 Wh
Voltaje batería	72 V
Tiempo de carga máximo	12 h
Masa máxima soportada	100 kg
Potencia de salida motores	1000Wx2
Indicado para	Ciudad
Autonomía	30 Km

Tabla 4.1: Especificaciones para el diseño del prototipo. Fuente: elaboración propia.

El prototipo diseñado se ha basado en las características de un segway clásico cuyo uso es para ciudad, introduciendo además la innovación del uso de motores *brushless hub* en vez de motores centrales con caja de engranajes, atendiendo al criterio de la mayor simplicidad posible en el diseño.

Con tal de no sobredimensionar la potencia de nuestro prototipo se han buscado motores *hub* de un solo eje cuyas prestaciones permitan garantizar las especificaciones anunciadas anteriormente en la tabla 4.1.

En cuanto a las especificaciones de voltaje, energía y tiempo de carga máximo de la batería, se ha decidido tomar como referencia los mismos valores que los del segway clásico, debido a que el diseño de una batería dificultaría mucho el proyecto. Por lo tanto, el prototipo a diseñar utiliza las baterías ya fabricadas de los segways clásicos imponiendo así en el diseño CAD las dimensiones de las cajas de las baterías.

Se ha decidido que la masa máxima soportada por el prototipo sea de 100 Kg, para abarcar a la mayoría de usuarios posibles. A partir de los 100 kg de masa, el funcionamiento del vehículo podría verse afectado, puede volverse inestable y no cumplir su función correctamente.

En cuanto a sus prestaciones se ha decidido que la velocidad máxima que debe desarrollar el vehículo sea de 30 km/h. Dado que nuestro prototipo está pensado para ser usado en la acera de las ciudades y debe compartir espacio junto a peatones y otros vehículos para el transporte personal, se ha considerado que la velocidad no debe ser superior a 30 km/h porque podría resultar peligroso para los viandantes. Por otro lado, se quiere que el prototipo diseñado tenga una autonomía mínima de 30 km para asemejarse a la del segway clásico.

En general, las características escogidas para nuestro diseño se adaptan a las del segway clásico, pues se espera conseguir un mismo comportamiento. Con tal fin, se ha considerado correcto diseñar nuestro prototipo basándonos en sus características.

4.1. Elección del motor: QS Single Shaft Motor *hub* 205

Una vez impuestas las especificaciones para el diseño de nuestro prototipo se ha procedido a buscar en el mercado actual motores *hub* que pudieran servir para nuestro prototipo. La primera dificultad que ha aparecido, de la cual ya nos avisó el tutor de este proyecto, ha sido el hecho que solo se han encontrado fabricantes chinos de motores *hub*, los cuales proporcionan poca información al respecto de sus productos en sus páginas web.

Un motor *brushless hub* es básicamente un motor que se instala directamente en los ejes de las ruedas y que no requiere de transmisión lo cual lo hace realmente atractivo para vehículos de transporte eléctricos.

Investigando, se detectó que actualmente hay varios fabricantes de motocicletas eléctricas que utilizan motores *hub* para la propulsión de sus motocicletas como por ejemplo la empresa barcelonesa Scutum Logistic, creadores de las motocicletas eléctricas *eco-silence* que actualmente se pueden encontrar en varias ciudades a través de empresas dedicadas al *motosharing*. Investigando sobre esta empresa, se encontraron varios fabricantes de motores *hub* para motocicletas entre ellos la empresa china QS Motor la cual dispone de un amplio catálogo de motores *hub* para todo tipo de vehículos eléctricos.

Para respetar el diseño típico de un segway clásico y no tener que diseñar nuevos métodos de sujeción de las ruedas, se ha introducido una restricción muy importante en la elección de los motores de las 2 ruedas. El motor *hub* que se debía escoger para nuestro prototipo, a diferencia de los motores utilizados para las motocicletas, tenía que ser de un solo eje para hacer posible su sujeción a la base del vehículo.

Entonces, observando el mercado actual se ha reducido drásticamente la variedad de productos ya que los motores *hub* de un solo eje aún no son ampliamente conocidos y su demanda no es tan notoria como la de los motores *hub* de 2 ejes.

A continuación se pueden observar 2 modelos de motores *hub* de la marca QS Motor donde se puede apreciar la diferencia entre un motor *hub* de 2 ejes y uno de un solo eje.



Ilustración 4.1: motor hub de 1 solo eje de la empresa QS Motor. Fuente: <http://www.qs-motor.com>



Ilustración 4.2: motor hub de 2 ejes de la empresa QS Motor. Fuente: <http://www.qs-motor.com>

Como se puede apreciar en las anteriores ilustraciones, el motor *hub* de 2 ejes es idóneo para motocicletas eléctricas pero para nuestro diseño representaría inconvenientes a la hora de realizar la sujeción. Por este motivo se ha centrado la búsqueda de motores en motores de un solo eje conocidos como “Single Shaft *hub* Motors”.

Una vez centrada nuestra búsqueda de motores en los motores de un solo eje, el primer problema que nos hemos encontrado ha sido el de no sobredimensionar el prototipo en términos de potencia. En el catálogo web de la empresa QS Motor todos los motores encontrados para 72 V (voltaje de las baterías de los vehículos tipo segway) eran motores con potencias superiores a los 3000 W lo que nos sobredimensionaría nuestro prototipo equipándolo con una potencia total mínima de 6000 W (3000 W a cada rueda). Entonces nos pusimos en contacto con los fabricantes y explicándoles nuestra situación nos explicaron que tenían motores de 1000 W y 10 pulgadas de diámetro (273 mm) los cuáles se adaptarían perfectamente a nuestras necesidades excepto por el voltaje ya que son motores que fabrican para voltajes de 48 y 60 V. Finalmente nos comentaron que si fuera necesario ellos mismos mediante la técnica del rebobinado del motor nos podrían suministrar los motores de 10 pulgadas y 1000 W de potencia nominal a un voltaje de 72 V lo cuál nos permitiría disponer de un motor de dimensiones correctas para nuestro prototipo y de potencia no sobredimensionada ya que los modelos actuales de Segways pensados para la ciudad van equipados con potencias nominales en cada rueda de entre los 400 y 2000 W.

Una vez comentada toda la situación con el tutor de este proyecto, se ha optado por elegir el modelo 205 del fabricante chino QS Motor para propulsar nuestro prototipo de un vehículo autobalanceado equipado con motores *hub*.

Una vez escogido el motor, se ha solicitado la ficha técnica del motor, la resistencia de la armadura del motor R_a y la constante de par K_T con el fin de poder calcular los nuevos parámetros una vez hecho el rebobinado e utilizarlos en la simulación de funcionamiento del vehículo en Excel.

El fabricante QS Motor nos proporcionó el valor de la resistencia de la armadura del motor para 60 V el cuál es de 0,5 Ohms junto a una ficha técnica del motor. En esta ficha técnica aparecía una tabla de puntos de funcionamiento del motor proporcionada por el fabricante para el modelo de 10 pulgadas de 1000 W de potencia y 60 V de voltaje.

A partir de esta tabla proporcionada en la ficha técnica del motor se ha procedido a realizar la gráfica de corriente-par electromecánico con el fin de obtener el valor de la constante de par tal y como se observa a continuación.

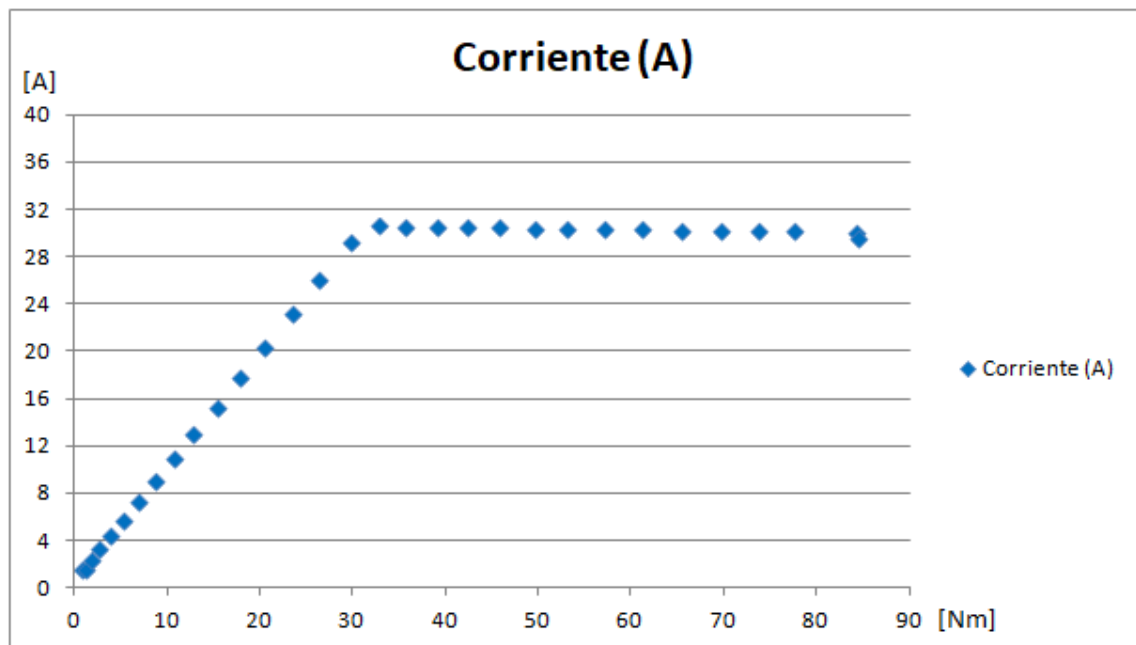


Ilustración 4.3: Gráfica de la intensidad en función del par electromecánico proporcionado por el motor. Fuente: elaboración propia.

En la gráfica que representa la intensidad del motor en función del par electromecánico se observan 2 regiones totalmente diferentes. Éstas corresponden a las 2 zonas de trabajo de un motor de corriente continua. De la primera región se puede obtener la constante de par ya que es el pendiente de la recta de la gráfica. Esta primera región de trabajo, que en el motor en cuestión va desde los 0 hasta los 32,7 Nm, se caracteriza por ser la región donde el motor trabaja a una K_T constante la cual es la variable que nos falta para poder tener definido el motor a 60 V y poder realizar el rebobinado. Con las herramientas de cálculo de Excel se obtiene la ecuación de la recta de esta zona de funcionamiento la cual es la siguiente:

$$y = 0,9452x + 0,9199$$

De esta ecuación se deduce que el valor de la constante de par del motor de 1000 W y 60 V del fabricante de QS Motor es de 0,9452 Nm/A.

Una vez se tienen completamente detalladas las especificaciones y escogido el motor a utilizar, ya se puede simular el funcionamiento del vehículo así como diseñar el prototipo.

5. Simulación del funcionamiento de un vehículo autobalanceado

En este apartado se procede a simular el comportamiento mecánico de un vehículo autoequilibrado para poder terminar de entender su funcionamiento. Para ello se realiza primero un modelo matemático del vehículo en función de las 2 variables (la aceleración lineal y angular) que permiten definir su comportamiento. Del modelo matemático se obtienen las ecuaciones que caracterizan el comportamiento del vehículo para posteriormente imponer las restricciones físicas para que se ajuste a la realidad y crear la simulación en una hoja de cálculo utilizando la herramienta Excel de Microsoft. Una vez obtenidas las ecuaciones mecánicas en función de la variable de entrada del momento proporcionado por el motor, se procede al diseño de un controlador PID que permita estabilizar el vehículo y avanzar en la dirección deseada solamente con el balanceo del propio cuerpo. A continuación mediante el uso del software informático Excel de Microsoft se crea una simulación de todo el comportamiento del vehículo a partir de todas las ecuaciones y variables introducidas en una hoja de cálculo que permite entender el funcionamiento de nuestro prototipo diseñado. Finalmente se calcula la energía consumida en un ciclo de funcionamiento para poder determinar la autonomía teórica del prototipo y se detallan los cálculos referentes al rebobinado del motor.

Nuestra simulación se ha centrado en describir y analizar el equilibrado del vehículo, por lo que para este apartado no se tendrá en cuenta la fricción con el aire y se supone un contacto puntual de la rueda con el suelo con lo cual la fuerza de rodadura será nula.

Cuando exista una inclinación del usuario respecto al eje vertical los motores *hub* se pondrán en marcha para equilibrar el vehículo con el usuario a la posición vertical la cual es la posición de equilibrio de nuestro sistema. Una vez el sistema ha alcanzado la posición de equilibrio, los motores *hub* de nuestro prototipo mantienen el vehículo a una velocidad constante. Si el usuario desea incrementar su velocidad, deberá partiendo de la posición de equilibrio, inclinarse de nuevo hacia adelante para que los motores vuelvan a efectuar la corrección de la posición angular y deje el vehículo a una velocidad constante mayor a la anterior. Si por el contrario, el usuario quiere reducir su marcha, deberá inclinarse hacia atrás de modo que el vehículo efectuará de nuevo otra corrección de la posición de equilibrio a una velocidad menor a la anterior. En el caso de circular marcha atrás, el funcionamiento será inverso: si el usuario se inclina hacia atrás adquirirá velocidad y si se inclina hacia adelante, la reducirá.

Para realizar el cálculo del consumo del prototipo y de su autonomía se ha realizado otra simulación con las mismas condiciones que la anterior simulación, pero suponiendo que el vehículo se mantiene

vertical en todo momento y realiza el siguiente ciclo: aceleración del vehículo partiendo del reposo hasta alcanzar una velocidad de 20 km/h con una aceleración de $0,1\text{m/s}^2$, mantenimiento a esta velocidad y pasados 60 segundos de funcionamiento desde el inicio de la simulación, volver a llegar al reposo a con una deceleración de $0,1\text{m/s}^2$. En este ciclo se ha calculado para el global de la distancia recorrida, la energía consumida por los motores *hub* y comparándola con la energía que contienen las baterías escogidas para utilizar se ha encontrado el número de ciclos que puede realizar el prototipo en una única carga y por lo tanto su autonomía teórica.

5.1. Modelo matemático de un vehículo autobalanceado

Recientemente, se han publicado muchos estudios técnicos sobre la mecánica y control de este tipo de vehículos pero en ninguno de ellos se estudiaba realmente lo que es un vehículo autobalanceado ya que se basaban en el modelo del péndulo invertido sobre un carro el cual no incorpora un momento motor que permite corregir la posición del vehículo para estabilizarlo en una posición de verticalidad respecto al suelo.

Por ejemplo, en las revistas científicas *Scientia et Technica* de la Universidad Tecnológica de Pereira y Revista de Ingeniería Eléctrica de la editorial Ercofan de Perú, se realiza el modelado del péndulo invertido sobre un carro a través de la mecánica newtoniana y la mecánica de Euler-Lagrange.

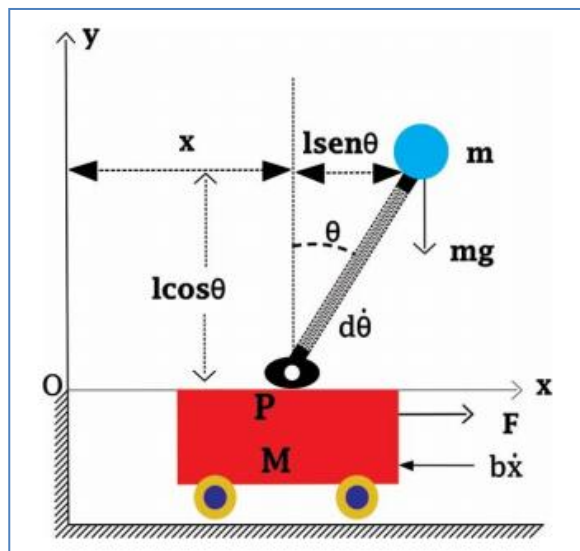


Ilustración 5.1: Sistema del péndulo invertido sobre un carro arrastrado por una fuerza externa F . Fuente: Revista *Scientia et Technica*, UTP.

El problema que nos hemos encontrado ha sido el siguiente. Aunque un vehículo autobalanceado puede parecerse a un péndulo invertido unido a un carro, realmente sus ecuaciones son distintas ya que para controlar el vehículo es necesario contar la aplicación de un momento motor para corregir la posición y estabilizarlo. En los modelados del péndulo invertido sobre un carro no aparece en ningún momento un momento motor a partir del cual poder implementar un controlador PID ya que se realiza un control del sistema a través de la fuerza externa F introducida en el carro tal y como se puede observar en la Ilustración 5.1 y la unión del péndulo a la base se hace mediante una unión articulada cuando en los segways clásicos no se utiliza dicha articulación.

En el caso del vehículo autobalanceado, éste no es arrastrado por una fuerza F externa a la cual se le realiza el control automático para estabilizar el péndulo sino que para estabilizar el vehículo y volverlo a su posición de verticalidad después de insertarle una cierta inclinación, se debe proporcionar un momento motor para corregir la posición que a la vez permite avanzar en la dirección de la inclinación del vehículo.

Para poder obtener las ecuaciones que nos modelen el comportamiento matemático de este tipo de vehículos se separa el sistema en 2 subsistemas a partir de los cuales se obtienen 2 ecuaciones que nos regirán todo el comportamiento físico del vehículo en función de la variable de entrada del momento motor (variable de entrada que será introducida por el controlador PID diseñado en el apartado 5.3).

Las variables que modelan nuestro sistema son la aceleración angular $\ddot{\varphi}$ (aceleración angular del conjunto persona y manillar respecto al eje vertical al suelo) y la aceleración lineal \ddot{x} (aceleración lineal de todo el conjunto respecto del suelo).

Antes de empezar con la descripción del sistema y proceder a encontrar su modelo matemático, se definen todas las variables del sistema:

- M : Masa del conjunto de las 2 ruedas más motores *hub*. Expresado en Kg .
- m : Masa del conjunto soporte más barra (incluye también el peso de las baterías y la electrónica interna). Si en el vehículo se le sube el conductor, este parámetro también incorporará su masa. Expresado en Kg .
- L : Longitud desde el apoyo de la barra en el soporte hasta el centro de masas de la barra. Expresado en metros.
- r : Radio de la rueda. Expresado en metros.
- F_{rod} : Fricción de los rodamientos del vehículo. Para simplificar esta simulación tal y como se ha explicado anteriormente no se han considerado las fricciones así que $F_{rod} = 0 N$.
- M_m : Momento proporcionado por el motor *hub* en el eje de las ruedas. Expresado en Nm .

- H, V: Fuerzas internas de enlace entre el soporte y el eje del motor *hub* o en su defecto si se utiliza motores *brushless* con cajas de engranajes, el eje de las ruedas. Expresado en *N*.
- J_{barra}: Momento de Inercia de la barra y el soporte en el punto G. En este momento de inercia se le debe sumar el momento de inercia de la persona cuando se haga la simulación en condiciones de uso. Expresado en *Kg·m²*.
- J_{rueda}: Momento de Inercia de las 2 ruedas (conjunto motores *hub* más neumáticos) en el punto C. Expresado en *Kg·m²*.

Una vez descritos los parámetros del sistema, ya se puede proceder a representar el vehículo en forma de 2 subconjuntos, realizar los diagramas del sólido libre y obtener finalmente las ecuaciones que definirán el comportamiento del prototipo y servirán para terminar de entender este tipo de vehículos.

A continuación se muestra el diagrama del sólido libre del conjunto soporte más la barra (el primer subconjunto de análisis del vehículo):

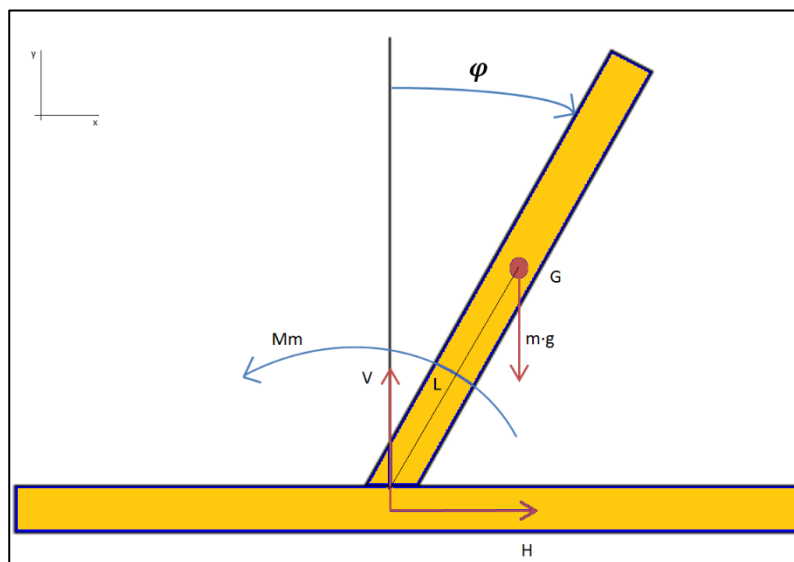


Ilustración 5.2: DSL del soporte más la barra. Fuente: elaboración propia

Del diagrama del sólido libre del soporte más la barra se obtiene las siguientes 3 ecuaciones realizando los respectivos sumatorios de fuerzas en los ejes x e y junto con el sumatorio de momentos en el punto G:

Realizando el sumatorio de fuerzas en el eje x se obtiene:

$$H = m \cdot \frac{d^2}{dt^2}(x + L \cdot \sin \varphi)$$

Si ahora se deriva y se deja solo en función de nuestras variables $\ddot{\varphi}$ y \ddot{x} , queda la siguiente expresión la cual la nombraremos como la ecuación 1:

$$H = m \cdot (\ddot{x} - L \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sen \varphi + L \cdot \ddot{\varphi} \cdot \cos \varphi) \quad (\text{ec. 1})$$

Realizando el sumatorio de fuerzas en el eje y se obtiene:

$$V = m \cdot g + m \cdot \frac{d^2}{dt^2} (L \cdot \cos \varphi)$$

Al derivar y dejar el sumatorio en el eje Y en función de las variables $\ddot{\varphi}$ y \ddot{x} queda la ecuación que nombraremos como la ecuación 2:

$$V = m \cdot g + m \cdot (-\dot{\varphi}^2 \cdot L \cdot \cos \varphi - \ddot{\varphi} \cdot L \cdot \sen \varphi) \quad (\text{ec. 2})$$

Finalmente, realizando el sumatorio de momentos externos en el punto G (centro de masa del manillar) se obtiene la ecuación 3:

$$H \cdot L \cdot \cos \varphi + Mm - V \cdot L \cdot \sin \varphi = -J_{\text{barra}} \cdot \ddot{\varphi} \quad (\text{ec. 3})$$

A continuación se muestra el diagrama del sólido libre de la rueda del vehículo (el motor *hub* con el neumático los cuales forman el segundo subconjunto de análisis del vehículo):

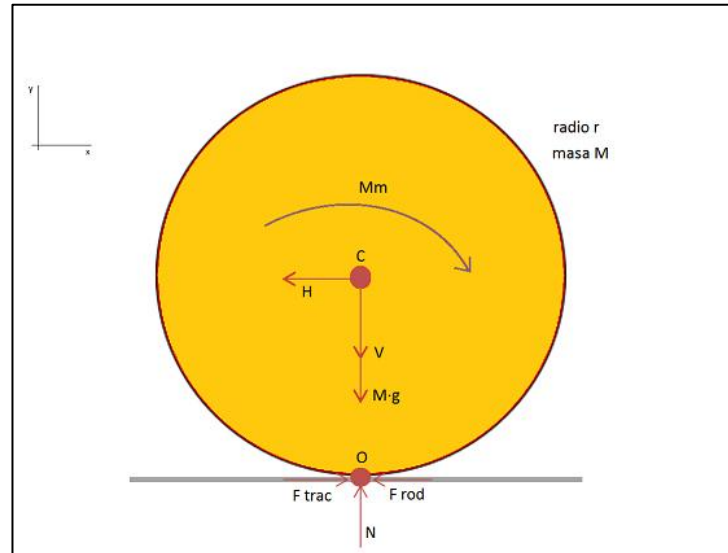


Ilustración 9: DSL del soporte más la barra. Fuente: elaboración propia

Del diagrama del sólido libre de la rueda se obtienen las siguientes ecuaciones (4, 5 y 6):

Realizando el sumatorio de fuerzas en el eje x se obtiene:

$$F_{trac} - F_{rod} - H = M \cdot \frac{d^2}{dt^2}(x)$$

Al derivar y dejar el sumatorio en el eje X en función de las variables $\ddot{\varphi}$ y \ddot{x} queda la ecuación que nombraremos como la ecuación 4:

$$F_{trac} - F_{rod} - H = M \cdot \ddot{x} \quad (\text{ec. 4})$$

Realizando el sumatorio de fuerzas en el eje Y se obtiene:

$$N - M \cdot g - V = 0 \quad (\text{ec. 5})$$

Finalmente, realizando el sumatorio de momentos externos en el punto C (centro de masa de la rueda) se obtiene la ecuación 6:

$$(F_{rod} - F_{trac}) \cdot r + Mm = J_{rueda} \cdot \frac{\ddot{x}}{r} \quad (\text{ec. 6})$$

Ahora, sustituyendo las ecuaciones 1 y 2 en la ecuación 3 se obtiene la siguiente ecuación:

$$-L \cdot m \cdot g \cdot \sin \varphi + m \cdot L^2 \cdot \ddot{\varphi} + m \cdot L \cdot \ddot{x} \cdot \cos \varphi + Mm = -J_{barra} \cdot \ddot{\varphi} \quad (\text{ec. 7})$$

La ecuación 7 encontrada permite relacionar el momento motor (Mm) con las variables del movimiento \ddot{x} , $\ddot{\varphi}$, φ .

Ahora para las ecuaciones procedentes del análisis de la rueda, sustituyendo la ecuación 4 a la 6 se obtiene la siguiente ecuación:

$$-H \cdot r - M \cdot \ddot{x} \cdot r + Mm = J_{rueda} \cdot \frac{\ddot{x}}{r}$$

Finalmente sustituyendo la ecuación 1 a la anterior ecuación se obtiene la ecuación 8:

$$-m \cdot (\ddot{x} - L \cdot \ddot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi + L \cdot \ddot{\varphi} \cdot \cos \varphi) \cdot r - M \cdot \ddot{x} \cdot r + Mm = J_{rueda} \cdot \frac{\ddot{x}}{r} \quad (\text{ec. 8})$$

Ahora para poder resolver el sistema compuesto por las ecuaciones 7 y 8 se deben reagrupar las ecuaciones para que sea fácil resolver el sistema aislando las variables de estado en función de unos parámetros que nombraremos con las letras A, B, C, D, E y F. Estos parámetros dependerán de la variable de entrada del Momento motor y de las posiciones y velocidades instantáneas del vehículo cuyos valores se obtienen a partir de las aceleraciones del instante anterior con el método de la integración mediante rectángulos. De este modo se puede crear una simulación en una hoja de

cálculo y representar las posiciones del vehículo en todo instante para poder luego aplicar por método de ensayo error un servomotor que permita estabilizarlo y avanzar.

El sistema va a ser de la siguiente forma:

$$\begin{cases} A \cdot \ddot{x} + B \cdot \ddot{\varphi} = C \\ D \cdot \ddot{x} + E \cdot \ddot{\varphi} = F \end{cases}$$

Expresando el sistema de este modo, se puede crear una simulación en una hoja de cálculo y representar las posiciones del vehículo en todo instante para poder luego encontrar por el método visual de ensayo-error un controlador PID que permita estabilizar el vehículo y avanzar (este proceso se explicará detalladamente más adelante).

Así pues, las nuevas ecuaciones 7 y 8 quedan de la siguiente manera:

$$m \cdot L \cdot \cos \varphi \cdot \ddot{x} + (m \cdot L^2 + J_{\text{barra}}) \cdot \ddot{\varphi} = L \cdot m \cdot g \cdot \sin \varphi - Mm$$

$$\left(-r \cdot m - \frac{J_{\text{rueda}}}{r} - M \cdot r\right) \cdot \ddot{x} - m \cdot r \cdot L \cdot \cos \varphi \cdot \ddot{\varphi} = -Mm - r \cdot m \cdot L \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi$$

Con estas ecuaciones una vez introducido un valor a la variable Mm (momento motor) y un intervalo de tiempo que representa el período de muestreo del sistema podremos saber en todo instante las aceleraciones, velocidades y posiciones del vehículo con lo que nuestro sistema queda completamente definido.

A continuación se procede a detallar los parámetros A , B , C , D , E y F obtenidos a partir de las nuevas expresiones de las ecuaciones 7 y 8.

$$A = m \cdot L \cdot \cos \varphi$$

$$B = m \cdot L^2 + J_{\text{barra}}$$

$$C = L \cdot m \cdot g \cdot \sin \varphi - Mm$$

$$D = -r \cdot m - \frac{J_{\text{rueda}}}{r} - M \cdot r$$

$$E = -m \cdot r \cdot L \cdot \cos \varphi$$

$$F = -Mm - r \cdot m \cdot L \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi$$

Finalmente, se procede a resolver el sistema de las 2 ecuaciones anteriores y se obtienen las 2 ecuaciones que una vez introducido un valor para el Momento motor y una período de muestreo constante permiten conocer en todo momento las posiciones x y φ del vehículo.

$$\begin{cases} A \cdot \ddot{x} + B \cdot \ddot{\varphi} = C \\ D \cdot \ddot{x} + E \cdot \ddot{\varphi} = F \end{cases}$$

$$\ddot{x} = \frac{F - E \cdot \ddot{\varphi}}{D} \quad \ddot{\varphi} = \frac{C \cdot D - A \cdot F}{D \cdot B - A \cdot E}$$

Con estas 2 ecuaciones ya ha quedado definido el comportamiento del vehículo.

5.2. Restricciones físicas al modelo

Para la realización de la simulación se utiliza la herramienta de cálculo Microsoft Excel tal y como se ha citado anteriormente. Se ha escogido utilizar esta herramienta de cálculo por su simplicidad de programación de cara al usuario y el hecho que es el usuario quien debe programar desde cero todas las ecuaciones del modelo y no se puede partir de ningún modelo pre programado. De esta forma utilizar la herramienta de cálculo de Microsoft permite una mejor comprensión de todo el modelo matemático del vehículo así como una mayor posibilidad de detectar errores más fácilmente que en otras herramientas.

El método utilizado para obtener las posiciones y velocidades en todo instante de tiempo de la simulación ha sido tal y como ya se ha comentado en el apartado anterior la integración mediante rectángulos. Este método simple pero a la vez útil para nuestras necesidades consiste en crear rectángulos y calcular el área bajo la función a partir de un intervalo de tiempo constante el cuál será nuestro período de muestreo para el control del motor. Con este intervalo de tiempo que puede ser ajustado por el usuario en la hoja de cálculo se recalculan las velocidades y la posición en el instante $t+1$ con los valores de la aceleración encontrados en el instante t . En el apartado 5.3 se determinará un período de muestreo a partir del cual se hace inestable el sistema para luego definir un período de muestreo apto para el control del vehículo.

Para crear la simulación en la hoja de cálculo de Microsoft Excel se han creado las columnas de posiciones, velocidades y aceleraciones de la variable angular y lineal así como las columnas que incorporan los parámetros A, B, C, D, E y F en cada instante. Como ya se ha comentado anteriormente la utilización de estos parámetros intermedios facilita la resolución del sistema y también permite la detección de posibles errores. Finalmente también se crea una tabla con los parámetros descritos en el apartado 5.1 y sus valores respectivos en nuestro caso de estudio.

Para que la simulación sea lo más real posible es necesaria la inserción de ciertas restricciones en el modelo matemático. Estas restricciones han sido las siguientes:

1. Limitación de caída al suelo del prototipo

Como el ángulo que determina la posición del vehículo respecto la vertical del suelo (el eje y) no puede ser un valor absoluto superior a 90 grados, ya que eso implicaría que el manillar atravesaría el suelo en la simulación del sistema, se deben introducir restricciones en la aceleración angular y velocidad angular para que una vez ha caído al suelo no continúe girando y (empezaría a atravesar el suelo) y se detenga. Así pues se ha definido que una vez la posición del ángulo φ llegue 90 o -90 grados, la aceleración angular $\ddot{\varphi}$ y la velocidad angular $\dot{\varphi}$ pasen a ser iguales a 0 impidiendo así que la posición angular llegue a atravesar el suelo.

Como se ha visto en anteriormente en la resolución del modelo matemático, la variable de la aceleración lineal \ddot{x} depende de los parámetros F, E, D y de la aceleración angular y a su vez F y E dependen de la aceleración angular, velocidad angular, posición angular y Momento motor. De esta forma, una vez el valor de la aceleración angular sea cero (restricción impuesta al llegar al suelo) y sin el controlador PID implementado, el cual proporciona un par motor que evita la caída del vehículo estabilizándolo y volviéndolo a la posición vertical, se consigue que caiga en la dirección de la perturbación inicial y se detenga una vez tocado el suelo tal y como se puede observar en la siguiente gráfica de la posición angular del vehículo en todo momento.

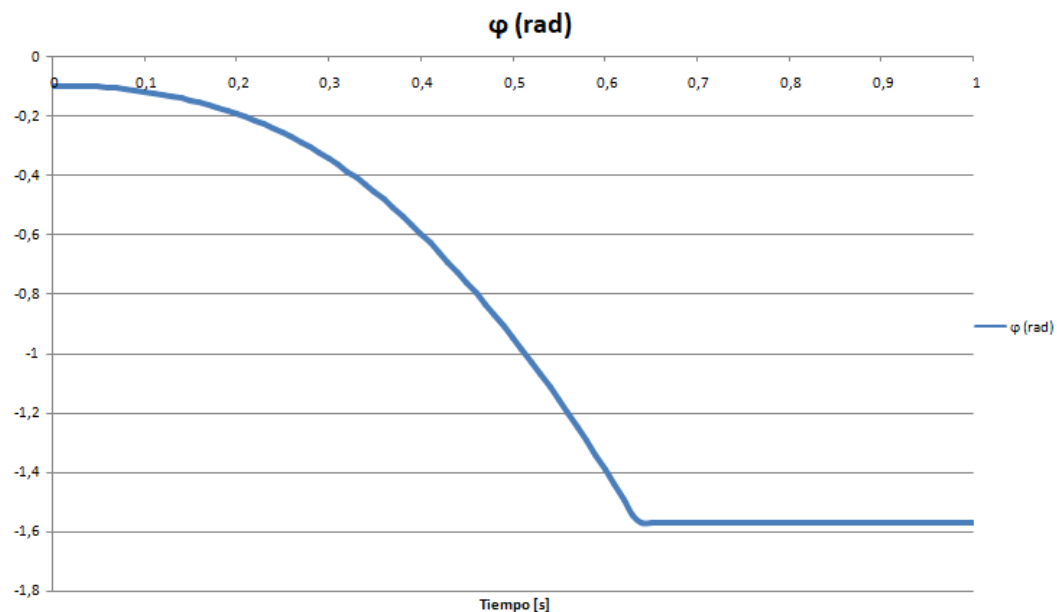


Ilustración 5.4: Gráfico de la posición angular del vehículo respecto al eje y (perpendicular al suelo) en función del tiempo expresado en segundos [s]. Fuente: elaboración propia.

En este gráfico se puede observar que sin la existencia de un controlador PID que introduzca la variable del momento motor en el sistema, una vez introducida una inclinación inicial diferente de 0 radianes (posición de equilibrio del sistema) el vehículo cae al suelo y se queda detenido una vez llegados a los -1,57 radianes (90 grados) en el instante de tiempo $t=0,6s$. Según el sistema de referencia utilizado en el diagrama del sólido libre para la obtención del modelo matemático, llegar a los -1,57 radianes equivale a haber caído hacia adelante.

A continuación se muestra el gráfico de la evolución de la posición del vehículo. Como se puede observar al introducir una inclinación hacia adelante, éste avanza durante la caída llegándose a detener unos instantes más tarde de la llegada al suelo.

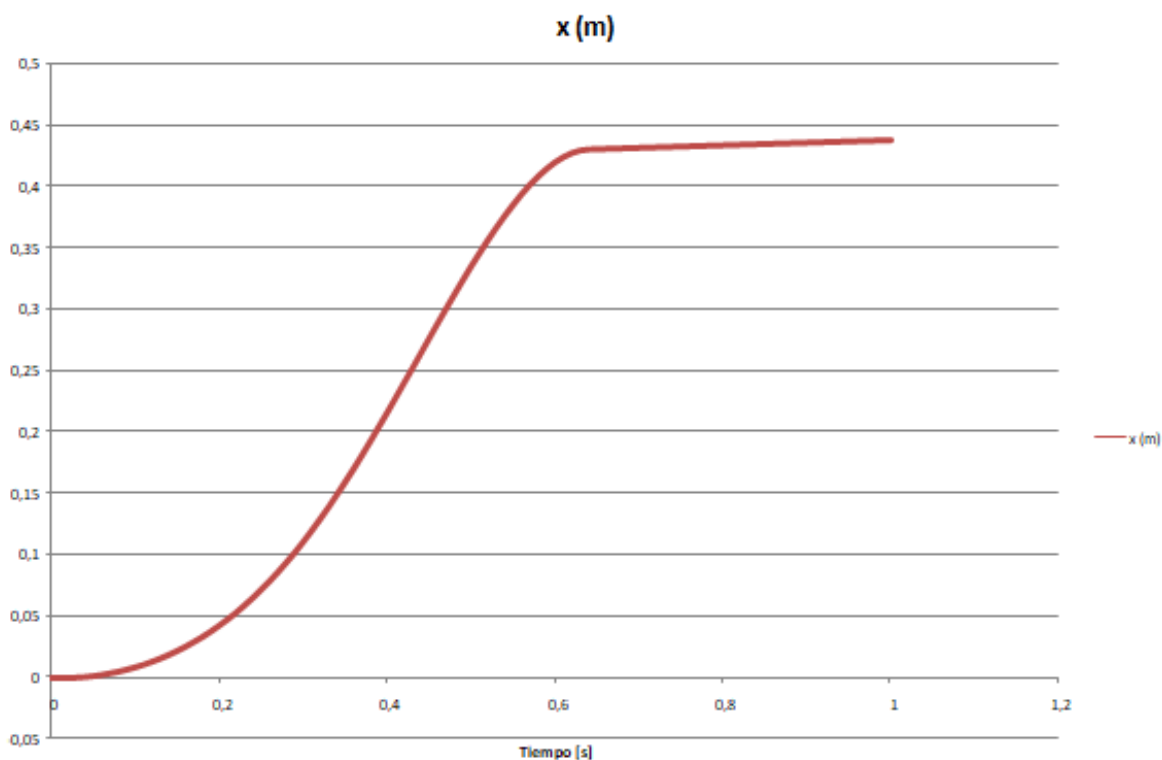


Ilustración 5.5: Gráfico de la posición lineal x del vehículo en función del tiempo expresado en segundos [s].

Fuente: elaboración propia.

Ambos gráficos nos indican que la restricción impuesta del suelo funciona correctamente ya que ahora nuestro prototipo, sin un controlador PID que proporcione un momento motor estabilizador del sistema, cae al suelo en la dirección que ha sido empujado y se desplaza en esta dirección en sentido contrario hasta llegar al suelo y quedar detenido.

Para el análisis de este caso particular se han usado los parámetros expuestos en la tabla que se adjunta a continuación.

Parámetros Constantes del problema	Nombre	Valor
Masa de los 2 motores <i>hub</i> con neumáticos (Kg)	M	30
Masa del soporte y el manillar (Kg)	m	40
Momento de inercia de las 2 ruedas ($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$)	Jr	0,48052
Momento de inercia del soporte y manillar ($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$)	Jb	0,2
Longitud de A hasta G (m)	L	0,65
Radio de la rueda con neumático (m)	r	0,1865

Tabla 5.1: Tabla con las variables utilizadas para la simulación del sistema sin una persona humana subida en el vehículo. Fuente: elaboración propia

Para la obtención de estos valores se ha usado la opción de cálculo de propiedades del software SolidWorks con el prototipo definitivo, siendo éstos valores aproximados. La masa de las ruedas corresponde a la masa del conjunto motores más neumáticos. En la masa del soporte y manillar si se quisiera simular la caída con el conductor encima del vehículo se le deberían sumar los 100 kilogramos de masa máxima soportada. Los momentos de inercia han sido calculados también por el programa SolidWorks especificando los materiales aluminio para el soporte y el manillar y acero para los motores.

2. Limitación de velocidad del prototipo

Esta limitación ha sido impuesta por las especificaciones impuestas en el diseño de nuestro prototipo. Tal y como se explica en el apartado de especificaciones, se ha determinado que la velocidad máxima que queremos que nuestro prototipo pueda alcanzar sea de 30 km/h por lo que en la simulación en la columna de la velocidad se le debe introducir esta restricción para que una vez llegue a esta velocidad no la supere aunque el conductor introduzca balanceos en el sistema para provocar así la aceleración.

5.3. Diseño controlador PID

El controlador escogido para asegurar la estabilidad y el correcto funcionamiento de nuestro vehículo es un controlador PID (controlador Proporcional Integrador Derivativo).

Un controlador PID es un mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular la posición, velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un

proceso en general. El controlador PID que se necesita para el correcto funcionamiento de nuestro prototipo debe calcular constantemente la diferencia entre una variable real del sistema y su variable deseada.

En nuestro sistema, se va a implementar un control sobre la variable de la posición angular del vehículo definida en el modelo matemático. Nos interesa que el PID mida la diferencia entre la posición angular real a cada instante (φ) y el valor referencia de 0 grados (φ_{ref}) (posición de equilibrio) y actúe en consecuencia variando el momento motor proporcionado por el motor *hub* para corregir y mantener la posición angular del vehículo una vez un agente externo al sistema (el conductor del vehículo o cualquier obstáculo) produzca una inclinación en la dirección de avance del vehículo.

Como en un vehículo autobalanceado para poder avanzar en una dirección es necesaria una leve inclinación durante un breve período de tiempo del conductor, la consigna de nuestro sistema es la posición angular y está es la que el conductor regulará para avanzar más o menos en la dirección y velocidad deseadas. El controlador PID actuará en el momento motor (nuestra variable de entrada en el modelo matemático) de manera que el motor proporcione un momento motor que permita corregir gradualmente la posición angular hasta llegar a la posición de referencia y estabilizar el vehículo. Una vez introducido en el sistema un momento motor en cada instante se corrigen las aceleraciones angular y lineal consiguiendo modificar en los sucesivos instantes las velocidades y posiciones angulares y lineales de nuestro vehículo.

Para obtener un controlador PID para nuestro vehículo se deben ajustar los tres parámetros fundamentales de cada módulo del controlador (k_p , k_i y k_d). Estos módulos son como indica su propio nombre el proporcional, el integrador y el derivativo.

El módulo proporcional en nuestro sistema mide la diferencia entre el valor de la posición angular en cada instante de tiempo y el valor de referencia que se fija en 0 grados ya que corresponde a la posición de equilibrio del vehículo. A esta diferencia se la llama Error.

$$\text{Error} = \text{Posición angular de referencia} - \text{Posición angular real}$$

El módulo integrador mide la suma de errores en los instantes anteriores sumado al error en el instante actual multiplicado por el incremento de tiempo escogido (el cual es nuestro período de muestreo del sistema). A esta suma de errores se le llama error integrador y se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Error Int}_t = \text{Error Int}_{t-1} + \text{Error}_t$$

Finalmente, el parámetro derivador calcula el pendiente de la variación de error de la posición angular entre el instante de tiempo anterior y el actual de la siguiente manera:

$$\mathbf{Error\ Der}_t = \frac{\mathbf{Error}_{t-1} - \mathbf{Error}_t}{\Delta t} = \dot{\varphi}$$

Como en nuestro caso el error es un error de posición angular respecto al valor de referencia, que es 0, se pueden simplificar los cálculos utilizando como error derivativo la velocidad angular en el instante t.

Para conseguir estabilizar nuestro prototipo mediante el uso de un controlador PID se necesita encontrar los valores de la constante proporcional, integral y derivativa que acompañan a los tres parámetros anteriores y comprobar mediante gráficos de la posición que el error sea del entorno a 0 y el sistema sea estable. También nos interesa encontrar unas constantes que no corrijan la posición muy bruscamente ya que en la realidad habrá una persona subida al vehículo y no es cuestión de realizar movimientos bruscos. También se intentará evitar oscilaciones en el sistema entorno al valor de referencia ($\varphi_{ref} = 0$) por el mismo motivo.

En nuestro sistema el controlador PID va a gestionar la variable de entrada de la simulación la cual era el Momento Motor para a partir de las ecuaciones extraídas del modelo matemático obtener unas nuevas aceleraciones angulares y lineales en los siguientes instantes que permiten contrarrestar la inclinación inicial del conductor del vehículo en una dirección para volver a la posición de equilibrio vertical y avanzar en la dirección deseada. Así pues, en la variable de entrada de la simulación del Momento motor (Mm) en cada instante se le introduce la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Mm}_t = k_p \cdot \mathbf{Error}_t + k_i \cdot \mathbf{Error\ Int}_t + k_d \cdot \mathbf{Error\ Der}_t$$

Una vez introducida esta ecuación en la simulación en la hoja de cálculos, solo queda empezar a probar valores para las constantes, determinar un período de muestreo mínimo para que el sistema no sea inestable y comprobar que los valores de Voltaje e Intensidad del motor para cada instante de la simulación sean factibles para el motor elegido.

Para calcular los valores de intensidad del motor en cada instante utilizaremos la siguiente ecuación:

$$I_t = \frac{Mm_t}{2 \cdot K_{T\ 72V}}$$

En esta expresión el Momento motor (Mm) se divide entre 2 debido al hecho que el momento motor en cada instante en nuestro sistema es la suma de los momentos motores proporcionados por los 2 motores iguales (1 a cada rueda). Si no se hiciera la división por 2 se obtendría la suma de las intensidades de los 2 motores.

Para calcular el Voltaje al que funcionan los 2 motores en cada instante, utilizaremos la siguiente ecuación de los motores de continua:

$$U_t = R_{a\ 72V} \cdot I_t + K_{T\ 72V} \cdot \omega_{mot_t}$$

Donde al tratarse de un motor *hub* donde el propio motor es la rueda del vehículo, la ω_{mot_t} se relaciona con la velocidad lineal del vehículo a través del radio de la rueda de la siguiente manera:

$$\omega_{mot_t} = \frac{\dot{x}_t}{r}$$

Una vez introducidas las ecuaciones del controlador PID y las de voltaje e intensidad del motor *hub* se puede proceder a determinar el controlador a base de probar valores para nuestro sistema.

A continuación se muestran los parámetros físicos del problema para la determinación del controlador PID.

Parámetros Constantes del problema	Nombre	Valor
Masa de los 2 motores <i>hub</i> con neumáticos (Kg)	M	30
Masa de la persona, soporte y manillar (Kg)	m	140
Momento de inercia de las 2 ruedas (Kg*m^2)	Jr	0,48052
Momento de inercia de la persona, soporte y manillar (Kg*m^2)	Jb	2
Longitud de A hasta G (m)	L	0,65
Radio de la rueda con neumático (m)	r	0,1865

Tabla 5.2: Tabla con las variables utilizadas para la simulación del sistema con una persona humana subida en el vehículo. Los valores de momentos de inercia y masas han sido calculados con las herramientas de medición del programa SolidWorks. Fuente: elaboración propia.

Para estos parámetros del sistema se obtienen las siguientes constantes proporcional, integral y derivativa para el control del vehículo usando un período de muestreo de 10 ms:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = -300 \\ K_i = 1,00e-5 \\ K_d = 30 \end{array} \right.$$

A continuación se muestra el gráfico de la posición angular de nuestro prototipo una vez subida una persona, realizada una inclinación y aplicado el controlador PID en el sistema:

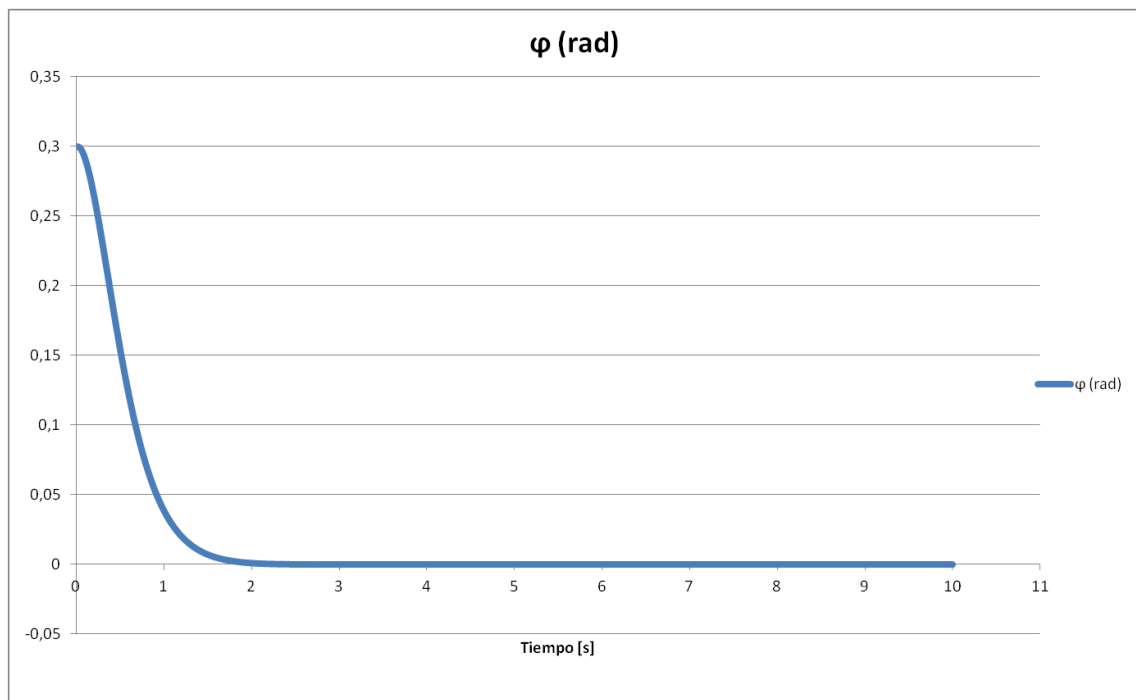
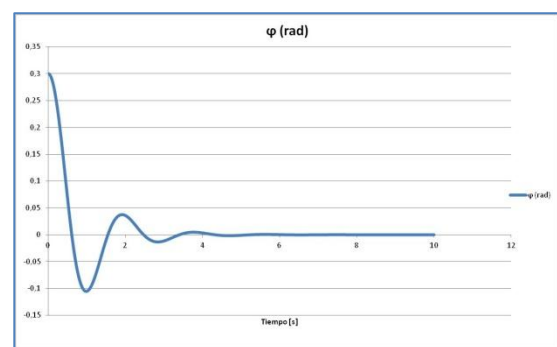


Ilustración 5.6: Gráfico de la posición angular del prototipo respecto al eje y (perpendicular al suelo) en función del tiempo expresado en segundos [s]. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la gráfica, el control PID hace que el sistema vuelva a la posición de equilibrio ($\varphi_{ref} = 0$) partiendo de una inclinación inicial de 0,3 radianes en un intervalo de tiempo entorno al segundo y sin producir oscilaciones. Experimentalmente se ha observado que para conseguir no caer al suelo (en el gráfico sería llegar a los 1,57 radianes) es necesaria la combinación de una K_p grande con una k_i pequeña y para evitar oscilaciones se aumenta la K_d .

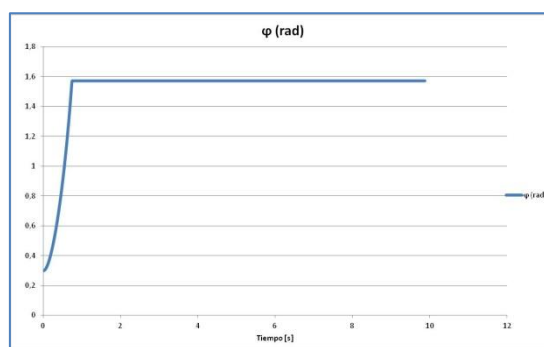
A continuación se analizan 4 casos donde la respuesta obtenida no sería correcta para nuestro prototipo:



CASO 1:

 $K_p = -300$ $K_i = 1,00E-05$ **$K_d = 10$**

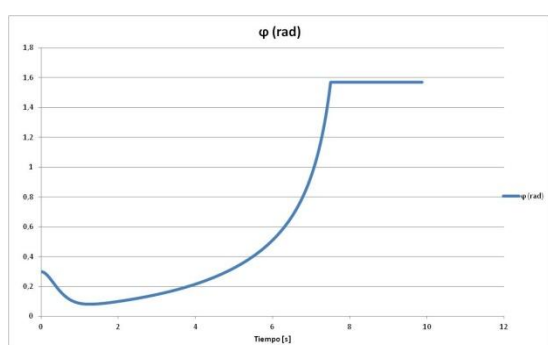
Período de muestreo (s) = 0,01



CASO 2:

 $K_p = -100$ $K_i = 1,00E-05$ $K_d = 30$

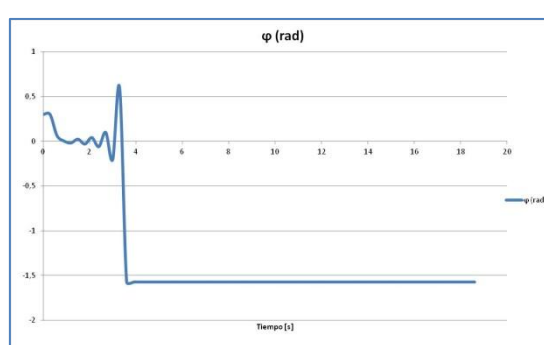
Período de muestreo (s) = 0,01



CASO 3:

 $K_p = -300$ **$K_i = 0,25$** $K_d = 30$

Período de muestreo (s) = 0,01



CASO 4:

 $K_p = -300$ $K_i = 1,00E-05$ $K_d = 30$ **Período de muestreo (s) = 0,3**

Tabla 5.3: Tabla con 4 casos en los cuales nuestro sistema sería inestable o con demasiadas oscilaciones que no permitirían el correcto funcionamiento del vehículo. Fuente: elaboración propia.

En el caso 1, se puede observar como con un valor pequeño de la constante derivativa nuestro sistema se estabiliza pero con muchas oscilaciones (partiendo de 0,3 radianes llega a -0,1 radianes) con lo cual no sería un buen controlador para nuestro vehículo.

En el caso 2, se puede observar como para valores de k_p inferiores a 260 en módulo el sistema no llega a hacerse estable ya que el vehículo va directo al suelo.

En el caso 3, se puede observar la importancia de un valor muy pequeño para la constante del módulo integrador. Con un valor superior (como por ejemplo 0,25) el vehículo al inicio parece que va a llegar a la posición de equilibrio a 0 grados pero finalmente termina cayéndose al no poder corregir el error integral del sistema que en cada instante se va haciendo más grande en valor absoluto. El valor de k_i es el más importante para poder llegar a la posición de equilibrio de nuestro vehículo ya que sin un valor muy pequeño no se puede conseguir llegar a un error de entorno al 0.

En el caso 4, se puede observar la importancia del período de muestreo de todo el sistema. Con un período de muestreo no adecuado, tal y como explica el teorema de Shannon, el sistema se hace inestable y en nuestro caso el vehículo termina al suelo. Probando valores se ha determinado un período de muestreo límite el cuál a partir de este valor el sistema es capaz de corregir la inclinación inicial. Este período de muestreo mínimo es de 0,2 segundos.

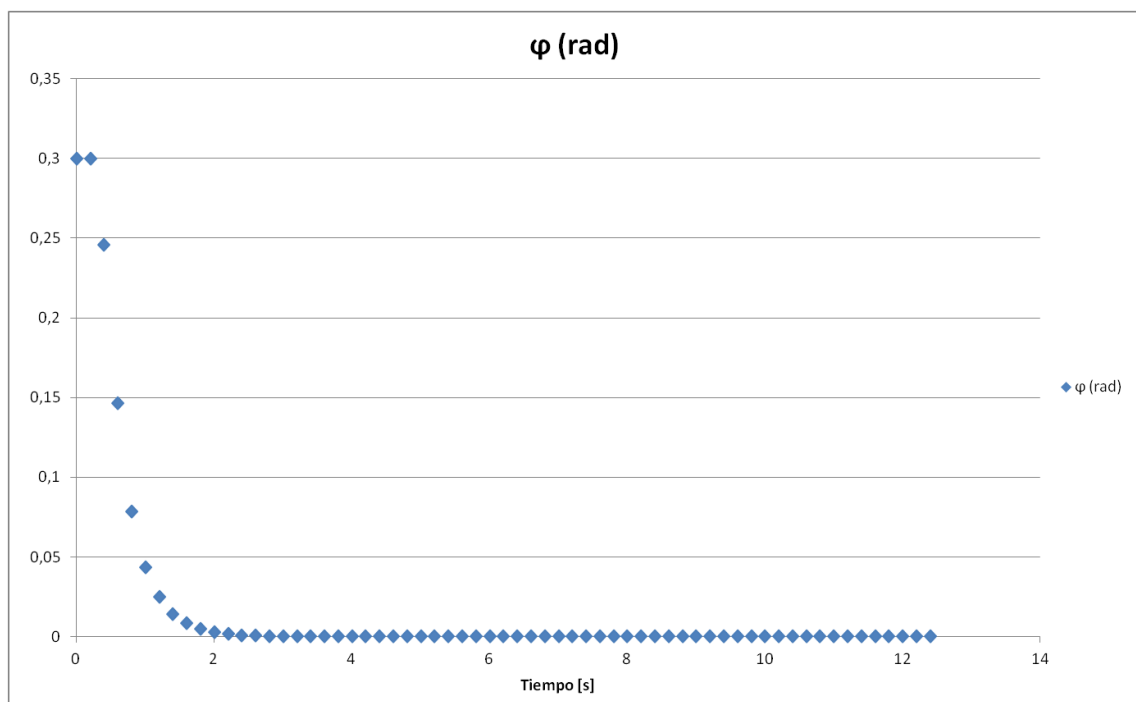


Ilustración 5.7: Gráfico de la posición angular del vehículo respecto al eje y (perpendicular al suelo) en función del tiempo expresado en segundos [s] con un período de muestreo de 0,2 segundos. Como se puede observar se consigue corregir la posición angular del vehículo y estabilizar el sistema en el valor de referencia. Fuente propia.

Finalmente comentar que a base de probar valores se ha determinado que para estabilizar nuestro sistema de manera correcta se requiere un período de muestreo del entorno a los 0,01 segundos ya que sin la intervención de los motores, el vehículo cae al suelo en menos de un segundo una vez ha sido introducida una inclinación en una dirección. Si se utilizan períodos de muestreo muy grandes el

sistema calcula muy pocas veces el momento motor a introducir para modificar la tendencia de la caída y no logra evitar la caída al suelo de nuestro vehículo.

5.4. Explicación funcionamiento del prototipo

Una vez diseñado el controlador PID a implementar en el sistema para equilibrar el vehículo se procede a detallar el comportamiento de nuestro sistema de equilibrado.

Primero de todo, como ya se ha comentado anteriormente, nuestro estudio del vehículo está realizado para el caso ideal en que no hay fricciones que actúen en el sistema. No se han considerado ni las fricciones internas del motor, ni las pérdidas aerodinámicas ni las fricciones por rodadura por lo que nuestro servo únicamente sirve para el equilibrado y estabilización del sistema. De este modo nuestro control PID permite equilibrar el vehículo cuando el conductor de éste realiza una inclinación en la dirección de avance produciendo así un movimiento en dicha dirección y una vez estabilizado el vehículo el consumo del motor pasa a ser nulo dejando el vehículo a una velocidad constante.

En nuestro sistema los motores *hub* solo consumen para equilibrar y estabilizar la posición. Si se *hubieran* considerado las pérdidas en el sistema, una vez conseguida la corrección del equilibrio (con unos tiempos de respuesta entorno al segundo) nuestro motor debería continuar consumiendo energía para vencer las resistencias al avance.

A continuación se procede a analizar el caso de una inclinación inicial del vehículo de 0,3 radianes (17,19 grados) durante un período continuado de tiempo de 1,0 segundos. Se utiliza un período de muestreo de 0,01s.

Para esta simulación se han usado los valores de los parámetros de la tabla 5.2. Estos valores han sido calculados a partir de las herramientas de medición del software informático SolidWorks así como a partir de las especificaciones de nuestro prototipo y de la ficha técnica del fabricante del motor. Las masas del conjunto ruedas (motores más neumáticos) son un dato proporcionado por el fabricante chino QS Motor. El momento de inercia de las 2 ruedas ha sido calculado a través del SolidWorks y es un valor aproximado ya que el fabricante no nos proporcionó el momento de inercia de sus motores. Para su cálculo se ha hecho un CAD del motor a partir de las dimensiones del motor proporcionadas en los planos del fabricante QS Motor.

La masa de la persona más el soporte y el manillar es de 140 kg la cual concuerda con nuestra especificación de masa máxima transportada de 100 kg más los 40 kg del conjunto soporte-manillar.

La masa de los motores *hub* con neumáticos es de 15 kg para cada rueda. En el SolidWorks se han realizado cálculos para obtener el momento de inercia de todo el conjunto a partir de representar una figura humana encima del vehículo de 100kg. Finalmente la longitud de A hasta G y el radio de la rueda han sido definidos por nosotros en el diseño del prototipo.

En los 3 primeros gráficos que se muestran a continuación se puede observar como el controlador PID corrige la inclinación inicial introducida por el conductor del vehículo, y establece una velocidad final constante de 10,84 km/h. Podemos decir que el PID implementado ha estabilizado el sistema.

Finalmente se muestran 3 gráficos para determinar que el PID diseñado se puede implementar con nuestro motor escogido. Estos gráficos son el de intensidad de corriente en el motor, la cual está relacionada en todo instante con el momento motor en cada rueda aplicado mediante la constante de par del motor, el del voltaje del motor y el de la potencia total consumida para el equilibrado (la de los 2 motores).

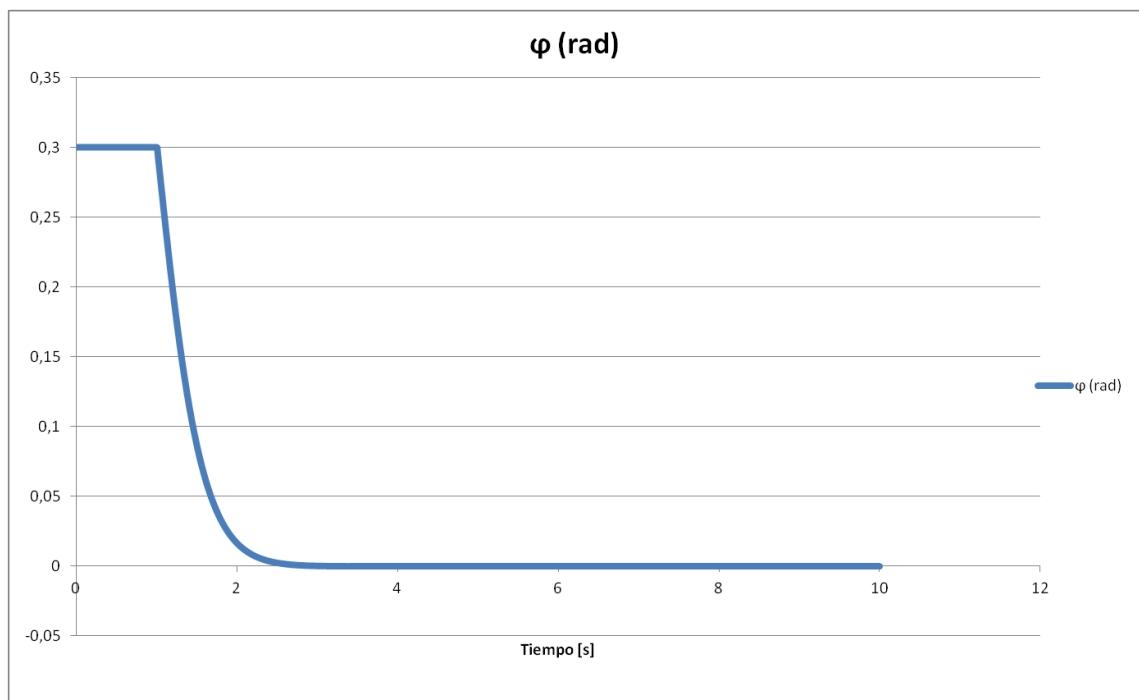


Ilustración 5.8: Gráfico de la posición angular del vehículo respecto al eje y (perpendicular al suelo) en función del tiempo expresado en segundos [s]. Fuente: elaboración propia.

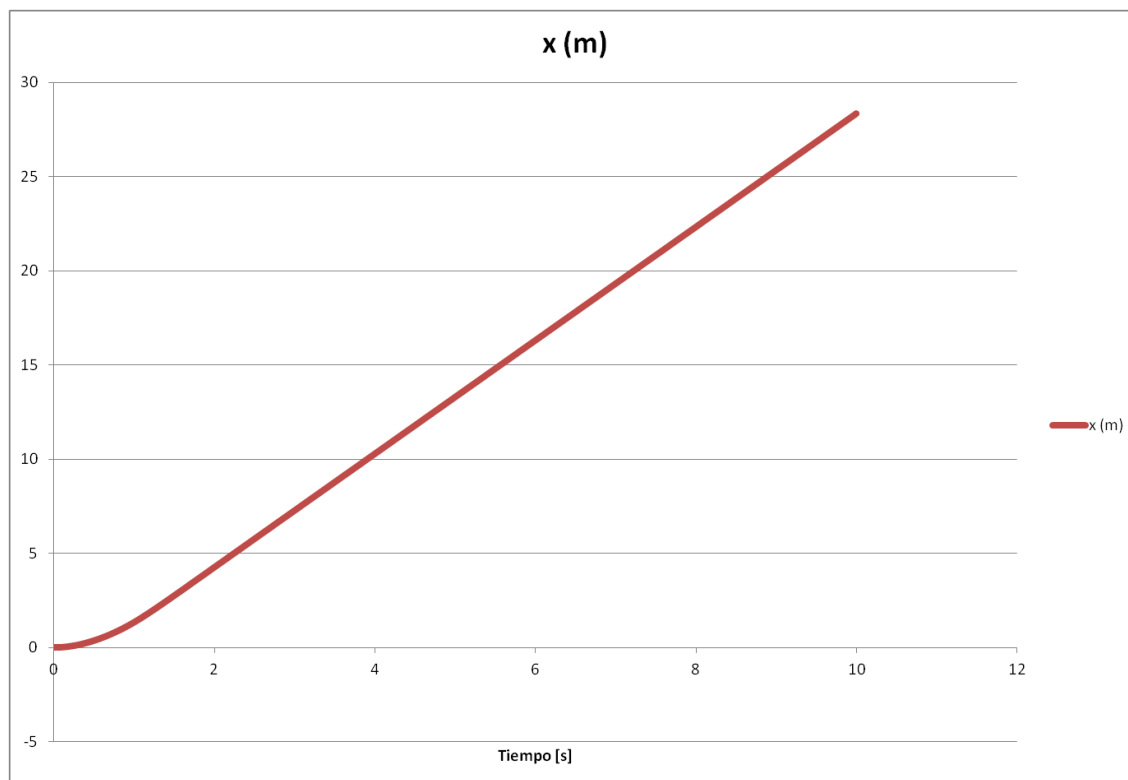


Ilustración 5.9: Gráfico de la posición lineal del vehículo en función del tiempo expresado en segundos [s].

Fuente: elaboración propia.

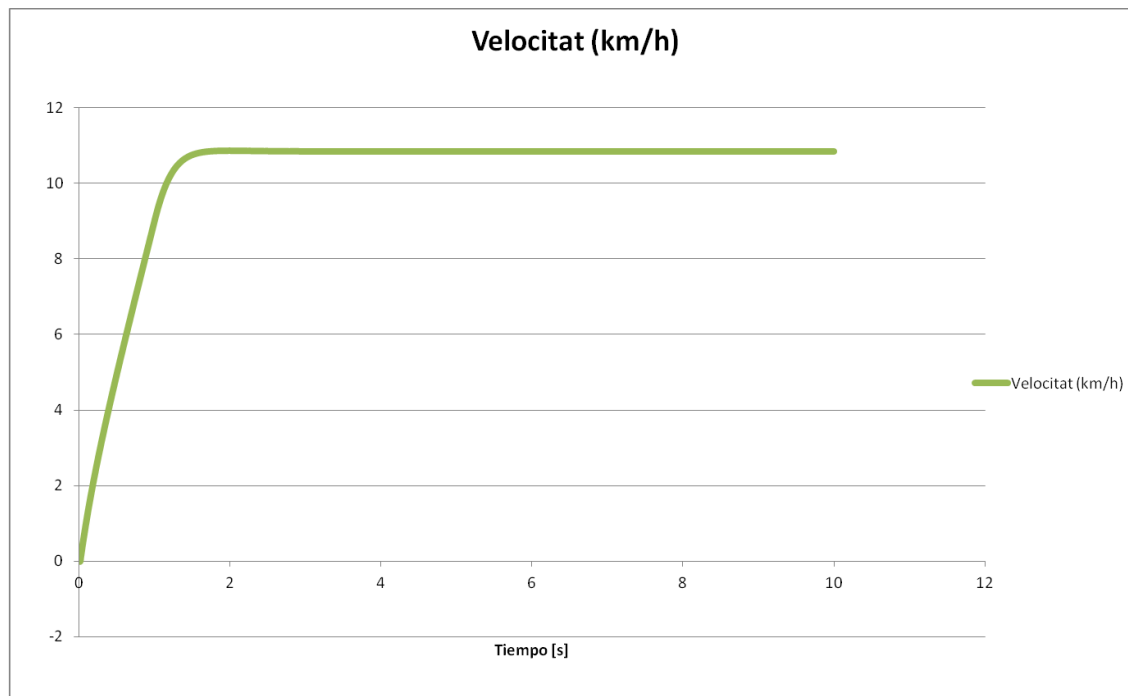


Ilustración 5.10: Gráfico de la velocidad del vehículo en función del tiempo expresado en segundos [s]. Fuente:

elaboración propia.

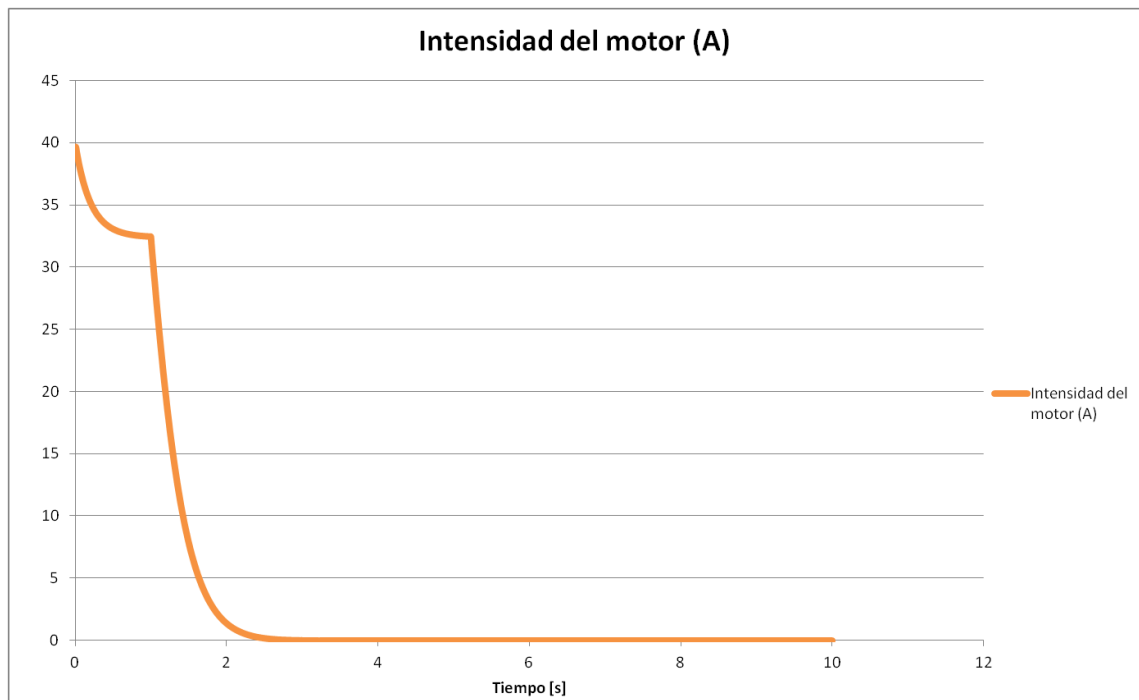


Ilustración 5.11: Gráfico de la Intensidad consumida por cada motor del vehículo en función del tiempo expresado en segundos [s].

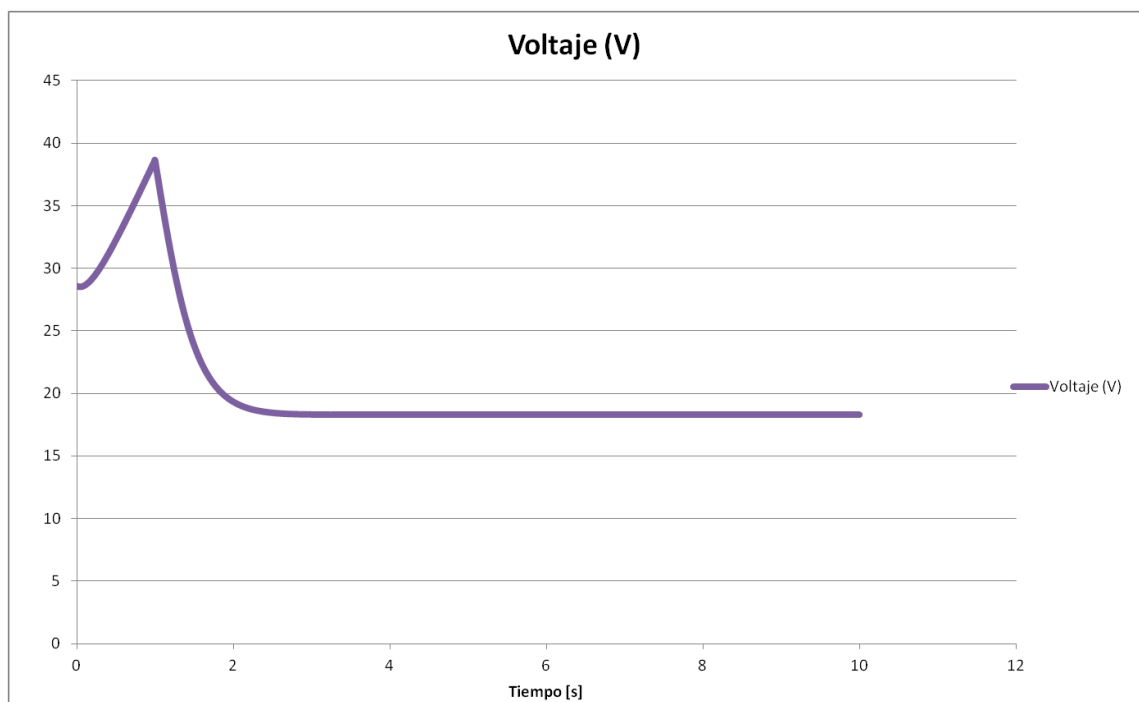


Ilustración 5.12: Gráfico del voltaje en cada motor del vehículo en función del tiempo expresado en segundos [s].

Fuente: elaboración propia.

5.5. Adaptación del motor a nuestras especificaciones

Como se ha explicado en el apartado de la elección del motor, para poder utilizar el motor *hub* de un solo eje del fabricante QS Motor en nuestro diseño es necesario realizar un proceso de rediseño del motor *hub* para poder disponer del motor escogido, pero adaptado a nuestro voltaje. De esta forma se consigue disponer de un motor *hub* con las dimensiones y potencia deseadas comprando el modelo *Single Shaft* 205 de 10 pulgadas de diámetro del fabricante chino QS motor.

El rebobinado o rediseño de un motor eléctrico permite ajustar la tensión del motor y cambiar el rendimiento de éste. También se practican rebobinados para reparar motores que han sufrido sobrecalentamientos y se han producido cortocircuitos del bobinado interno como por ejemplo un cortocircuito entre 2 espiras o un cortocircuito producido en las colillas de conexión.

Al realizar la adaptación del motor es necesario recalcular las constantes K_T y R_a del motor que nos definirán el comportamiento del motor de 72V y 1000W que incorporará nuestro prototipo para poder introducir estos parámetros en la simulación de Excel. El controlador PID, tal y como ya se ha explicado, debe proporcionar el momento motor necesario en todo momento para mantener la verticalidad del prototipo, estabilizarlo y desplazarse en el sentido deseado por el conductor dentro de unas condiciones de trabajo permitidas por el motor y es aquí donde se necesita conocer las constantes del motor.

Con tal fin se procede a buscar las ecuaciones que nos permitirán relacionar las constantes de ambos motores (el motor original de 60V y el obtenido de 72V después de realizar el rebobinado pertinente). Como cuestión práctica, cabe destacar que el propio fabricante chino QS Motor ofrece la posibilidad de vender los motores rebobinados por ellos mismos adaptándose a las necesidades de sus clientes.

Antes de empezar, se procede a enunciar las constantes del motor a 60V proporcionadas por el fabricante:

$$K_{T\ 60V} = 0,9452\ Nm/A$$

$$R_{a\ 60V} = 0,5\ \Omega$$

Para calcular la nueva K_T utilizaremos las siguientes ecuaciones de un motor *brushless*:

$$U = K_T \cdot \omega$$

$$60\ V = K_{T\ 60V} \cdot \omega$$

$$72\ V = K_{T\ 72V} \cdot \omega$$

Como queremos que la velocidad de giro del motor sea la misma para 60V que para 72V:

$$K_{T\ 72V} = \frac{72}{60} \cdot K_{T\ 60V}$$

$$K_{T\ 72V} = 1,13424\ Nm/A$$

Una vez obtenida la K_T para el motor a 72V se procede al cálculo de la nueva R_a . Para ello es necesaria una breve demostración teórica.

La fuerza magnética en un conductor rectilíneo cualquiera se expresa con la siguiente ecuación:

$$F = I \cdot L \times B = I \cdot L \cdot B \cdot \sen \alpha$$

Considerando la espira como la unión de 4 tramos rectilíneos se puede calcular la fuerza magnética en cada uno de los 4 tramos como se puede observar en las siguientes figuras:

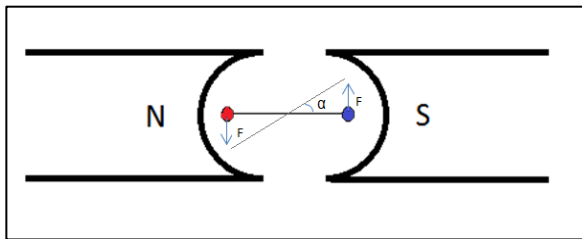


Ilustración 5.13: Representación del movimiento de una espira en el motor. Fuente: elaboración propia.

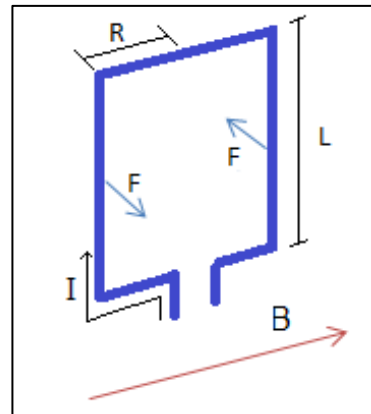


Ilustración 5.14: Representación de una espira del bobinado del motor. Fuente: elaboración propia.

A continuación se calcula el momento resultante de la fuerza magnética en una espira:

$$M = 2 \cdot F \cdot R = 2 \cdot I \cdot L \cdot B \cdot \sen \alpha \cdot 2 \cdot R$$

$$S = L \cdot 2 \cdot R \quad (\text{S es la sección de la espira})$$

$$M = I \cdot B \cdot S \cdot \sen \alpha$$

Como en nuestro motor *hub* hay N espiras, el momento resultante de las fuerzas magnéticas pasa a ser el siguiente:

$$M = I \cdot B \cdot S \cdot \sen \alpha \cdot n$$

Así mismo, la ecuación que relaciona el momento electromecánico que proporciona el motor con la Intensidad es la siguiente:

$$M = K_T \cdot I$$

Igualando ambas ecuaciones se obtiene la siguiente relación de aproximación:

$$K_T \approx B \cdot S \cdot n ; n \approx \frac{K_T}{B \cdot S}$$

Para un conductor de tipo cable como lo es la espira de nuestro motor, la resistencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R = (2 \cdot L + 4 \cdot R) \cdot \frac{\rho}{S_{hilo}}$$

Como nuestro motor está compuesto por n espiras de resistencia R, obtenemos la resistencia de la armadura del motor (R_a) multiplicando la resistencia de una espira por el número de espiras:

$$R_a = (2 \cdot L + 4 \cdot R) \cdot \frac{\rho}{S_{hilo}} \cdot n$$

A partir de esta ecuación aislamos la superficie del hilo o cable:

$$S_{hilo} = \frac{R_a \cdot n}{\rho \cdot (2 \cdot L + 4 \cdot R)}$$

Como se va a utilizar el motor *hub* de 1000W y 60V proporcionado por la empresa QS Motor pero habiendo realizado un rebobinado del motor para que éste pueda trabajar a los 72V que nos proporciona nuestra batería, se obtiene que el número de espiras por la superficie de los cables que conforman cada espira es constante. Esto es debido al hecho que tanto en el motor de 60V como en el motor de 72V tenemos el mismo espacio físico para meter las espiras.

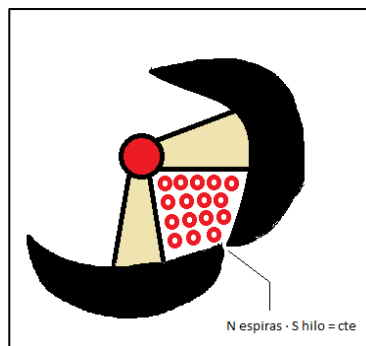


Ilustración 5.15: Representación del número de espiras por su grosor. Fuente: elaboración propia.

$$S_{hilo} \cdot n = constante$$

Ahora sustituyendo la ecuación de la superficie del hilo (S_{hilo}) y la ecuación del número de espiras (n) a la anterior relación obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{(2 \cdot L + 4 \cdot R) \cdot \rho}{R_a} \cdot \left(\frac{K_T}{B \cdot S} \right)^2 = constante$$

Como las variables L , R , ρ , B y S son constantes, la anterior ecuación se puede simplificar de la siguiente manera:

$$\frac{K_T^2}{R_a} = constante$$

A partir de esta ecuación y con la $K_{T\ 72V}$ anteriormente calculada, ya se puede obtener la nueva R_a del motor una vez hecho el rebobinado:

$$\frac{K_{T\ 60V}^2}{R_{a\ 60V}} = \frac{K_{T\ 72V}^2}{R_{a\ 72V}}$$

$$R_{a\ 72V} = \left(\frac{K_{T\ 72V}}{K_{T\ 60V}} \right)^2 \cdot R_{a\ 60V}$$

$$R_{a\ 72V} = 0,72\ \Omega$$

En conclusión, una vez realizado el rebobinado del motor *hub* de 10 pulgadas de 1000W y 60V comprado a QS Motor para que pueda trabajar a un voltaje nominal de 72V, las constantes del nuevo motor quedan de la siguiente manera:

$$K_{T\ 72V} = 1,13424\ Nm/A$$

$$R_{a\ 72V} = 0,72\ \Omega$$

Llegados a este punto, cabe destacar que si se procediese a la construcción del prototipo, una vez se hubieran comprado los motores al fabricante QS Motor ya rebobinados, se realizarían mediciones en el laboratorio para determinar de forma experimental los verdaderos valores para las constantes de par y resistencia de armadura de los motores a utilizar en el prototipo y así tener unos valores reales de cara a futuros ajustes del controlador y de la simulación. Como este proyecto no ha entrado en la parte de la construcción del prototipo con motores *hub*, se ha decidido utilizar para los cálculos de la simulación los valores encontrados analíticamente para los motores una vez realizados los rebobinados partiendo de los valores proporcionados por el fabricante para sus motores de 60V.

5.6. Cálculo consumo del prototipo

En este apartado se procede a calcular el consumo de nuestro vehículo una vez el sistema está equilibrado para poder avanzar a una velocidad constante en llano. Como se ha visto en los apartados anteriores, con nuestro PID diseñado se consigue realizar el equilibrado del vehículo y ponerlo en marcha pero el motor solo consumía energía para el equilibrado y no para desplazarse hacia una dirección a velocidad constante. Esto sucedía porque se había realizado una simulación sin considerar las pérdidas del sistema. Por lo tanto en este apartado se simula el prototipo como un modelo unidimensional donde no se tiene en cuenta la inclinación angular del conductor y si se consideran las pérdidas de fricción con el aire y la fuerza de rodadura. Como en la anterior simulación, se empieza determinando el modelo matemático para obtener posteriormente la relación del momento motor proporcionado en cada instante con tal de vencer la resistencia al avance. Finalmente se calcula la autonomía de nuestro prototipo a partir de las especificaciones de las baterías escogidas.

Los parámetros utilizados para este nuevo modelo son los siguientes:

- $m_{vehículo}$: Masa total del vehículo con el conductor. Expresado en Kg.
- J_{rueda} : Momento de Inercia de la rueda (conjunto motor *hub* más neumático). Expresado en $Kg \cdot m^2$.
- r : Radio de la rueda con neumático. Expresado en metros.
- F_{rod} : Fuerza de rodadura. Donde: $F_{rod} = \mu \cdot N$, μ es el coeficiente de fricción.. Fuerza expresada en N.
- M_m : Momento proporcionado por cada motor *hub* en el eje de las ruedas. Expresado en Nm.
- F_{aire} : Fuerza de resistencia al avance con el aire. Donde: $F_{aire} = 0,5 \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_{aire} \cdot v^2$, C_x es el coeficiente de penetración, S es la superficie frontal, v es la velocidad constante a la cual se mueve nuestro prototipo y ρ_{aire} es la densidad del aire que corresponde al término de la densidad del fluido por donde se desplaza el vehículo. Fuerza expresada en N.

A continuación se muestra un modelo equivalente de 2 ruedas de nuestro vehículo considerando que está avanzando a una velocidad constante en un terreno sin pendiente y que el valor de la posición angular (φ) es nulo en todo momento.

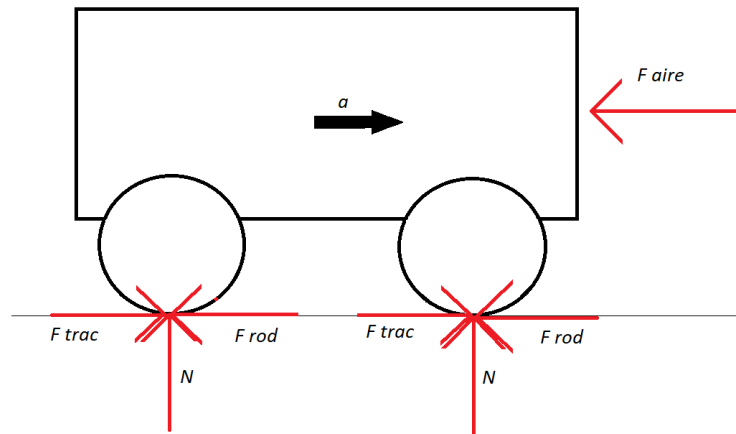


Ilustración 5.16: Modelo equivalente de 2 ruedas de nuestro vehículo. Fuente: elaboración propia.

Realizando el sumatorio de fuerzas en el eje x se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sum F_x = m \cdot a$$

$$2 \cdot F_{trac} - 2 \cdot F_{rod} - F_{aire} = m \cdot a \quad (\text{ec. 1})$$

$$\text{Donde: } F_{trac} = \frac{Mm}{r}$$

A continuación, para calcular la masa m , a la masa del vehículo $m_{vehículo}$ se le suma el término que corresponde a la masa reducida de una rueda a 1 eje multiplicado por el número de ruedas (en nuestro prototipo son 2 ruedas):

$$m = m_{vehículo} + 2 \cdot \frac{J_{rueda}}{r^2} \quad (\text{ec. 2})$$

Finalmente, sustituyendo la ecuación 2 en la 1 y expresando la fuerza de tracción en función de la variable momento motor se obtiene la ecuación que nos permite calcular en todo instante el par motor necesario en cada rueda para desplazar nuestro prototipo en llano:

$$Mm = \frac{1}{2} \cdot r \cdot (F_{aire} + m \cdot a + 2 \cdot F_{rod}) \quad (\text{ec. 3})$$

$$Mm = \frac{1}{2} \cdot r \cdot (0,5 \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_{aire} \cdot v^2 + (m_{vehículo} + 2 \cdot \frac{J_{rueda}}{r^2}) \cdot a + \mu \cdot m_{vehículo} \cdot g)$$

En una nueva hoja de cálculo para esta simulación se introducen los parámetros físicos del sistema, la ecuación 3 y las constantes del motor *hub* (la constante de par y la resistencia a la armadura) y se define un ciclo de análisis. Para este ciclo se ha decidido que el vehículo acelere a una velocidad de 0,1g hasta alcanzar los 20km/h y luego al pasar 60 segundos de haberse iniciado el desplazamiento el

vehículo frene con una aceleración de $-0,1g$ hasta detenerse.

A través de la constante de par se obtiene la intensidad de cada motor en cada instante de la simulación tal y como se ha hecho en la simulación del equilibrado del vehículo y utilizando el valor de la resistencia de la armadura se obtiene la gráfica de voltaje del ciclo. La energía consumida durante el ciclo se calcula a partir de la potencia consumida por los 2 motores hub.

$$P_{cons} = 2 \cdot V \cdot I$$

Para esta simulación se han utilizado los valores para los parámetros que se adjuntan a continuación:

Parámetros Constantes del problema	Nombre	Valor
Masa vehículo (Kg)	$m_{vehículo}$	170
Momento de inercia de 1 rueda (Kg*m ²)	Jrueda	0,24026
Coefficiente de penetración	Cx	1,1
Superficie frontal	S	0,9
Radio de la rueda con neumático (m)	r	0,1865
Coefficiente de Fricción	μ	0,02
Densidad del aire	d	1,225
Gravedad (m/s ²)	g	9,81

Tabla 5.4: Tabla con las variables utilizadas para la simulación del sistema con una persona humana subida en el vehículo. Fuente: elaboración propia.

Para el coeficiente de penetración (Cx) y la superficie frontal se han utilizado los valores tabulados para el caso de un ciclista obtenidos del artículo *The mechanics and aerodynamics of cycling* de Kyle, Ch. R publicado en la revista científica *Medical and Scientific Aspects of Cycling* citado en los apuntes en línea de *Biomecánica de las Técnicas Deportivas* de la Universidad de Castilla la Mancha.

Para el coeficiente de fricción se ha buscado valores tabulados para la fricción de neumáticos en el asfalto y se ha determinado un coeficiente de fricción de 0,02.

A continuación se procede a mostrar las gráficas obtenidas para el cálculo del consumo del prototipo para el ciclo anteriormente explicado (un primer tramo de aceleración de $0,1g$, un tramo de avance a velocidad constante y un tramo de frenada a $-0,1g$ hasta detener el prototipo).

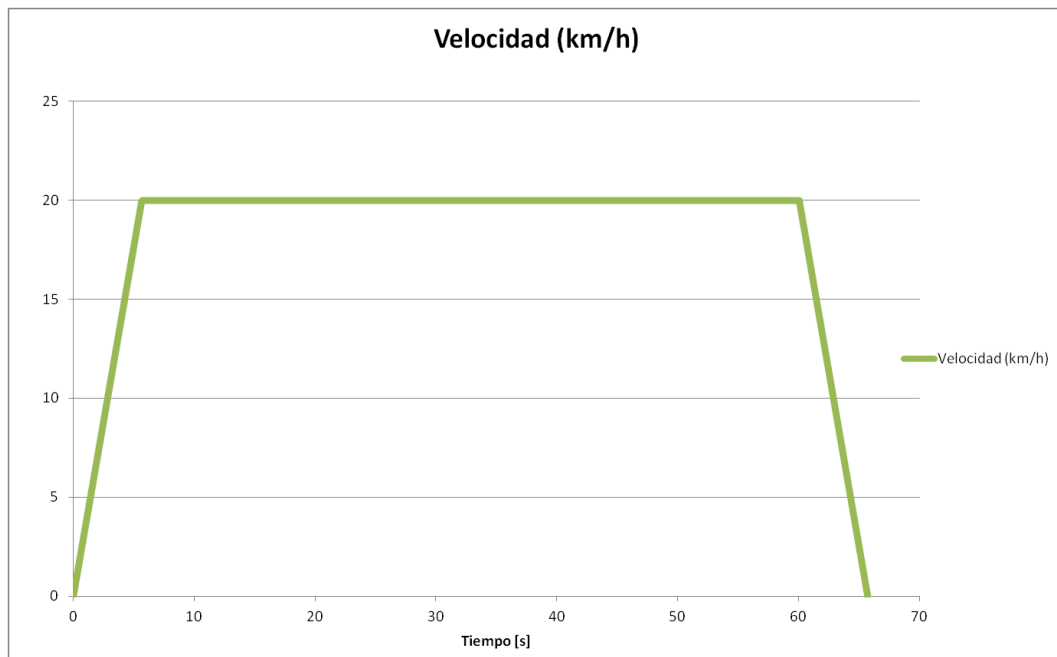


Ilustración 5.17: Gráfico de la velocidad del prototipo en función del tiempo expresado en segundos [s]. Se puede observar perfectamente el ciclo de la simulación. Fuente: elaboración propia.

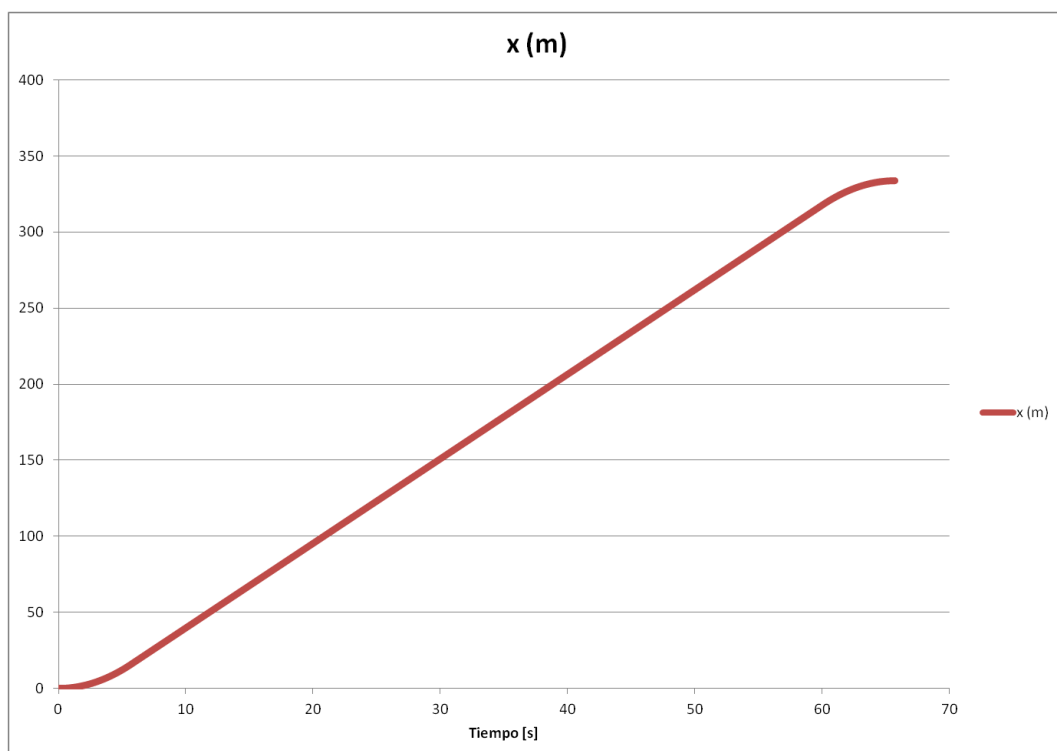


Ilustración 5.18: Gráfico de la posición del prototipo en función del tiempo expresado en segundos [s]. El ciclo entero de la simulación corresponde a un desplazamiento total de 333,61 metros. Fuente: elaboración propia.

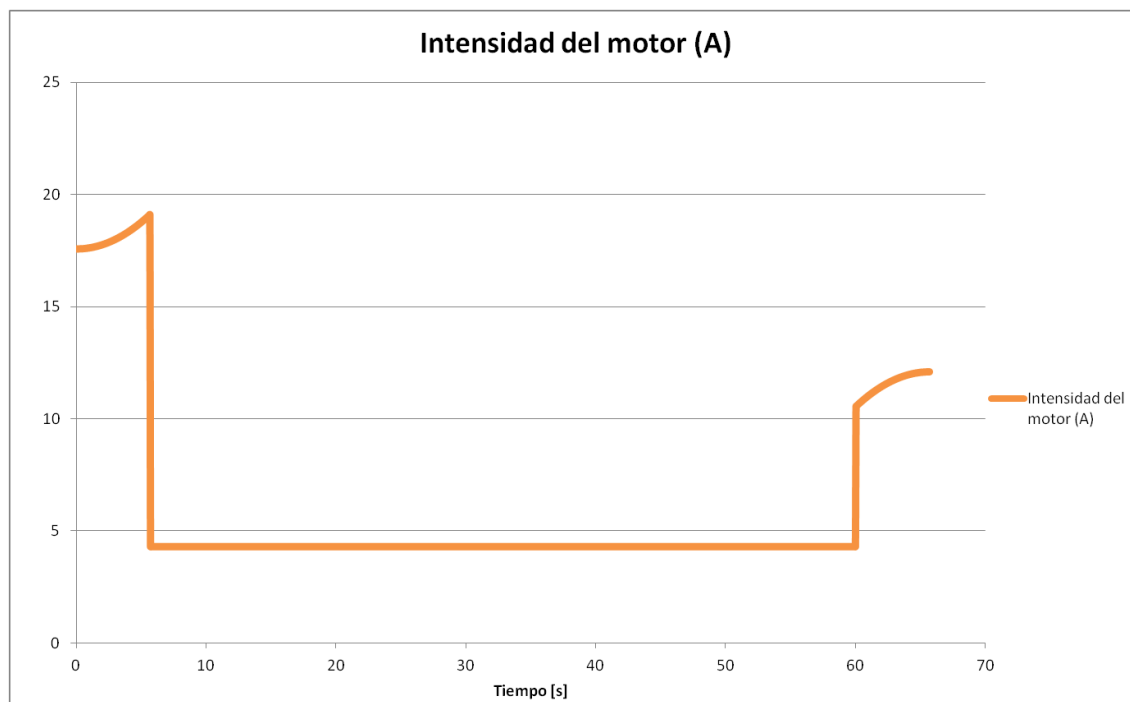


Ilustración 5.19: Gráfico de la intensidad consumida por cada motor del prototipo en función del tiempo expresado en segundos [s]. Fuente: elaboración propia.

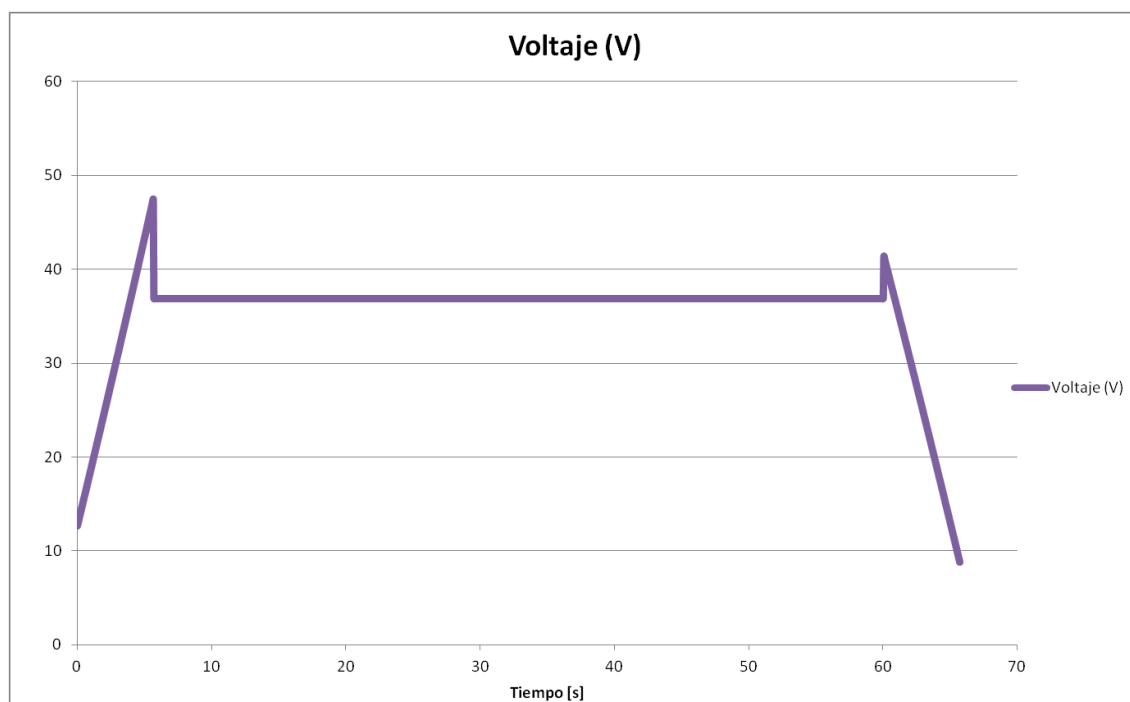


Ilustración 5.20: Gráfico del voltaje en cada motor del prototipo en función del tiempo expresado en segundos [s]. Fuente: elaboración propia.

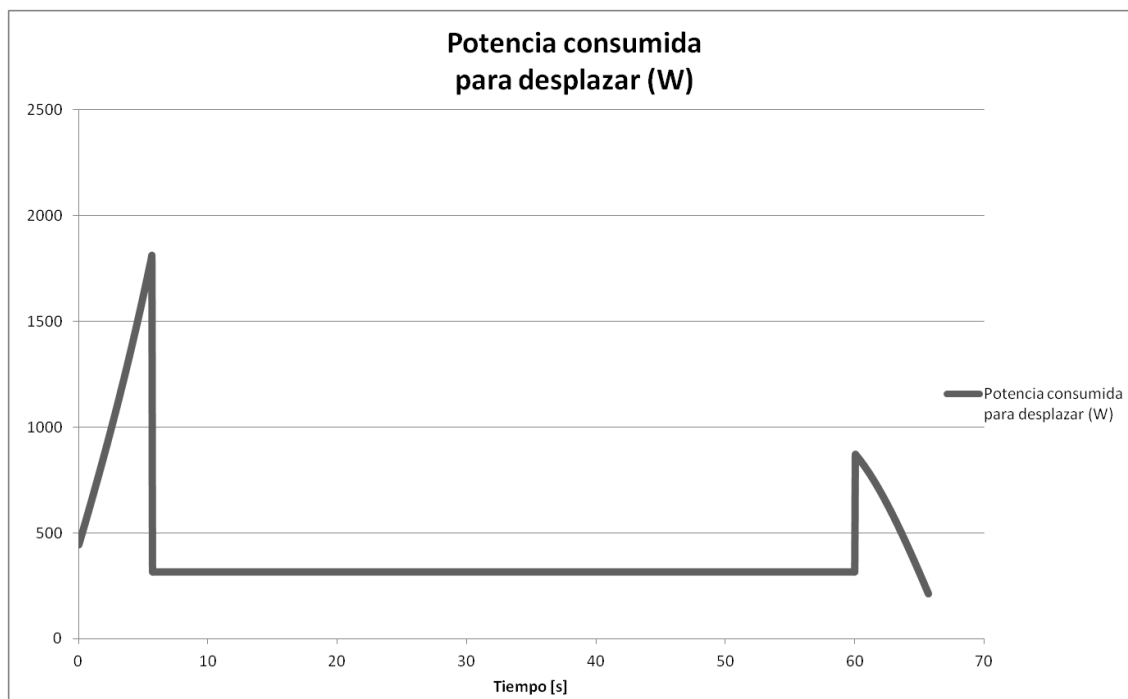


Ilustración 5.21: Gráfico de la potencia empleada en cada motor del prototipo en función del tiempo expresado en segundos [s]. Fuente: elaboración propia.

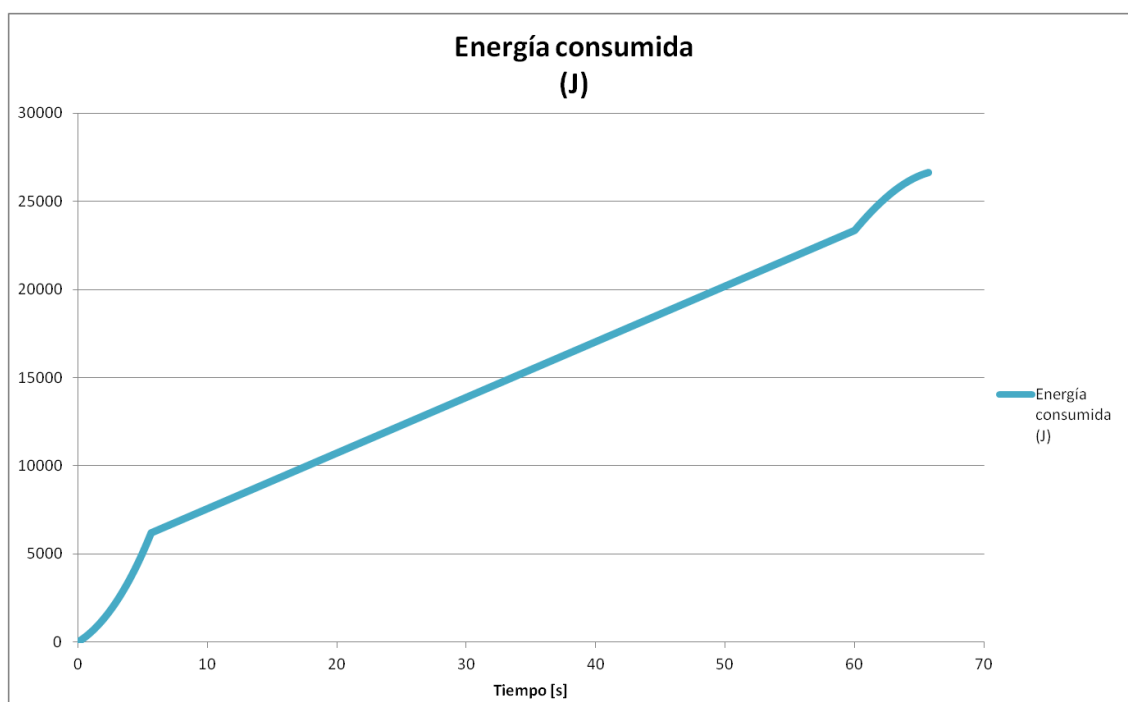


Ilustración 5.22: Gráfico de la evolución del consumo de energía durante el ciclo de funcionamiento. Al terminar el ciclo y estar el prototipo detenido el consumo es de 26647,27 J. Fuente: elaboración propia.

Tal y como se detalla en la tabla 3.1 del estado del arte, la batería del segway clásico (modelo i2) es de 382Wh. Si suponemos que nuestra batería va a proporcionar un 80% de esta energía en condiciones reales de funcionamiento y a lo largo de su ciclo de vida podemos calcular la autonomía de nuestro prototipo de la siguiente manera:

La energía proporcionada en un ciclo entero de descarga de la batería en Joules es de:

$$\text{Energía proporcionada por las 2 baterías} = 2 \cdot 382 \cdot 3600 \cdot 0,8 = 2200320 \text{ J}$$

Como en un ciclo de la simulación de 333,61 metros se consumen en total 26647,27 J para el ciclo completo de la simulación explicado anteriormente, con la energía proporcionada por las baterías, la autonomía de nuestro prototipo en llano es de:

$$\text{Autonomía} = n^{\circ} \text{ ciclos} \cdot 333,61 \text{ m/ciclo}$$

$$n^{\circ} \text{ ciclos} = \frac{2200320 \text{ J}}{26647,27 \text{ J/ciclo}} = 82,57 \text{ ciclos a velocidad constante de } 20 \text{ km/h}$$

$$\text{Autonomía total del prototipo} = 82,57 \cdot 0,33361 = 27,55 \text{ km}$$

Este valor de autonomía calculado corresponde a la autonomía de nuestro prototipo en condiciones de conducción en llano. En el caso del segway clásico i2, la autonomía estipulada en la ficha técnica es de 38 km pudiendo superar pendientes máximos de 20 grados según sus especificaciones.

6. Diseño detallado del prototipo

Dadas las especificaciones deseadas para nuestro vehículo y la propuesta de introducir una nueva tecnología de motor, se procede a realizar el diseño del prototipo. Para el diseño del prototipo se ha usado el programa SolidWorks 2018. Se han diseñado tres módulos: base del vehículo con baterías, el motor *hub* y el manillar. El motor *hub*, así como las baterías ya tienen un diseño predefinido, ya que el motor se adquiere directamente de una empresa fabricante y las baterías son las mismas que las de un segway clásico.

Al tratarse de un modelo nuevo, en el que la distribución de algunos elementos ha cambiado, u otros que han sido sustituidos con el fin de comprobar su viabilidad y funcionalidad, se ha decidido realizar el diseño únicamente de un prototipo y no un diseño definitivo comercial.

6.1. Diseño asistido por ordenador del prototipo

El diseño del prototipo se ha realizado en tres módulos: la base del vehículo con baterías, el motor *hub* y el manillar. Cada módulo ha sido diseñado mediante el uso de geometrías sencillas, permitiendo así que el prototipo sea de fácil entendimiento.

Este es el prototipo representado a partir de los módulos que se han recreado y ensamblado. En los siguientes apartados se explica cómo se han diseñado cada módulo y con qué materiales está pensado una futura construcción.

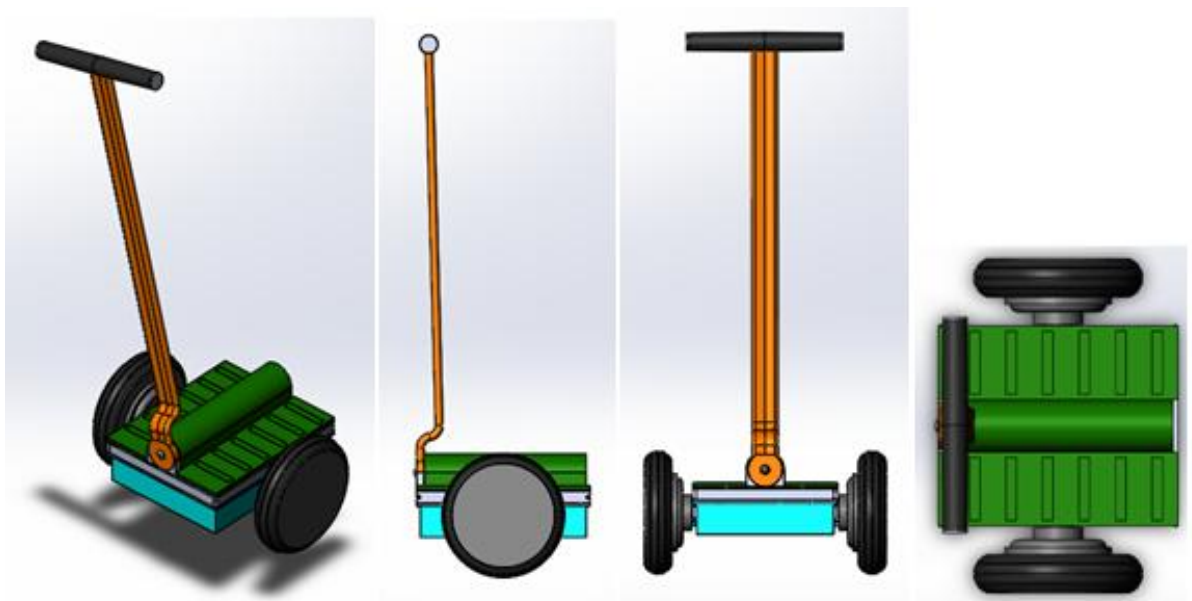


Ilustración 6.1: Vistas distintas del prototipo completo. Fuente: elaboración propia

La base del vehículo corresponde al bloque que contiene toda la electrónica usada para la gestión del vehículo, junto con las baterías y el soporte para los pies. La base para pies consiste en la cobertura superior de la base donde el usuario debe colocar sus pies, a la vez que actúa como carcasa para proteger el sensor *leansteer* la estructura en la que va montado.

El manillar corresponde a la pieza del prototipo que va unida a la base mediante el cual se puede dirigir el vehículo. Está compuesta por un mango horizontal para las manos y el eje *leansteer*, el cual puede unirse a la base mediante un soporte que contiene el sensor *leansteer* para detectar el giro del manillar.

Los motores *hub* son los motores implementados en la rueda, por lo que deben ir unidos a la base.

6.1.1. La base del vehículo

Se entiende por la base a la estructura que contiene la electrónica del vehículo y en el cual el usuario apoya sus pies para utilizarlo. En el caso de los segway clásicos actuales también contienen los motores *brushless* DC.

En la zona interna de la estructura se ubica toda la electrónica y el computador relacionados con el sistema de equilibrado. Esto incluye el conjunto de sensores giroscópicos y de inclinación, el sistema de alimentación para el alumbrado del vehículo y de los motores. El ordenador se encarga de recibir la información de los sensores y gestiona el funcionamiento del alumbrado y el funcionamiento de los motores.

Debajo de la base del vehículo se unen las baterías. Por la parte superior, está situado un acople para el eje *leansteer* unido a una estructura que contiene el sensor que permite identificar cuando el manillar está siendo inclinado hacia un lado u otro y envía la consiguiente orden al ordenador.

En los dos lados correspondientes a las ruedas, en el caso de un segway clásico, están ubicados la caja de engranajes, la cual va unida a la salida del motor y la salida de dicha caja va unida al eje de la rueda. En los costados delanteros y traseros está ubicado el sistema de alumbrado, con luces rojas en el costado trasero y blancas en el delantero. Algunos pueden no llevar alumbrado.

Para nuestro diseño, se ha tenido en cuenta que en nuestro vehículo se usarán motores *hub*, por lo que ya no será necesario incluir los motores *brushless* en la base, ni tampoco la caja de engranajes. Además no se ha añadido un sistema de alumbrado por no complicar el diseño del prototipo dado que no afecta a su funcionalidad principal. Aunque la geometría de la base de un segway clásico sea mucho más elaborada, en nuestro caso, al diseñar un prototipo, se deberá usar una geometría más simple, ya que en principio un prototipo se usa para comprobar la funcionalidad del objeto.

Mediante el programa de diseño asistido por ordenador, se ha diseñado la siguiente base:

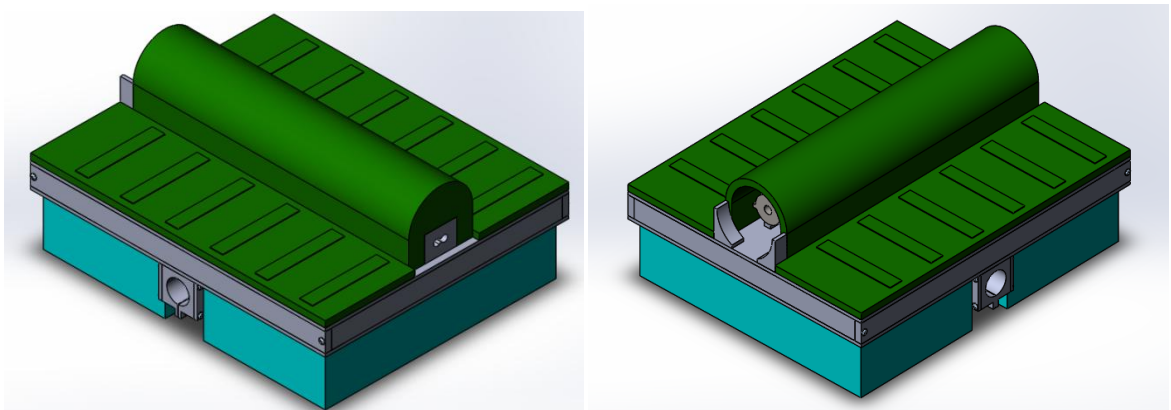


Ilustración 6.2: Base del vehículo. Fuente: elaboración propia.

Esta es la base de nuestro prototipo. En ella se pueden ver tres partes diferenciadas, las cuales corresponden a la cubierta del sensor *leansteer* y la plataforma para los pies (en verde), el bloque central (en gris), y las baterías (en azul).

El bloque central consiste en una estructura rígida construida mediante planchas de un grosor de 10 mm y 5 mm. Estas planchas han sido escogidas de una aleación del aluminio con magnesio y silicio: el aluminio 6061. Esta aleación es idónea debido a sus buenas propiedades mecánicas y su uso en soldaduras.

Las planchas están unidas mediante tornillos, como se explica más adelante.

Primeramente se ha diseñado en planta la cubierta inferior con una lámina de 380 x 460 x 5 mm.

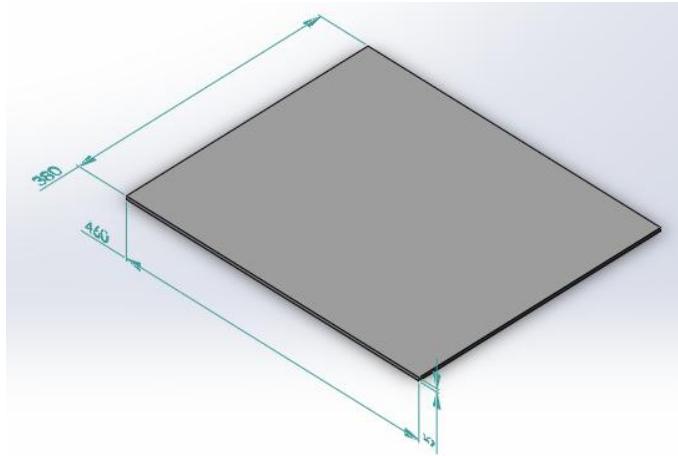


Ilustración 6.3: Cubierta inferior de la base del vehículo. Fuente: elaboración propia

Seguidamente, se han diseñado las cuatro paredes laterales que conformarán una caja donde almacenar la electrónica. Estas se han creado con dos láminas de 10 x 460 x 30 mm y dos de 10 x 360 x 30.

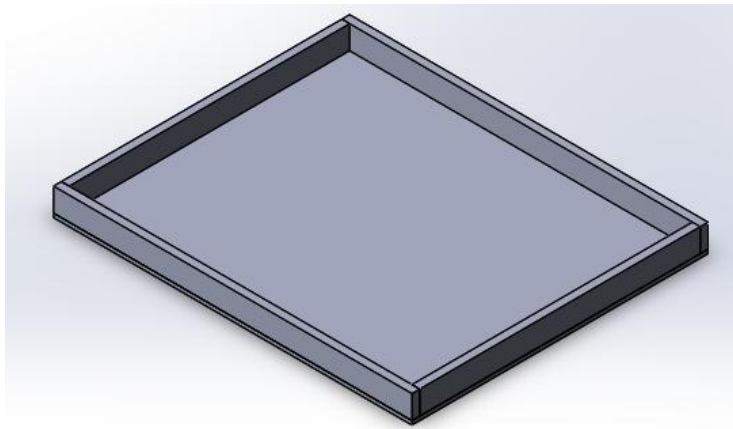


Ilustración 6.4: Paredes laterales del recinto exterior de la base. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se ha creado el soporte para los motores *hub*, también de aluminio 6061. Este soporte tiene el siguiente perfil, que se extiende hasta cubrir completamente el eje del motor.

Este soporte agarrará el eje del motor, que es la única parte que no gira cuando está activado, juntando las dos pestañas salientes separadas inicialmente por 1mm mediante un apriete con tornillo y tuerca. Para el otro motor se ha realizado una pieza simétrica en el otro costado de la pieza. Para conseguir una mayor rigidez a la flexión, se han añadido dos láminas de 5 x 380 x 50 mm, entre los soportes de los motores, las cuales irán unidas también a la cubierta inferior de la base.

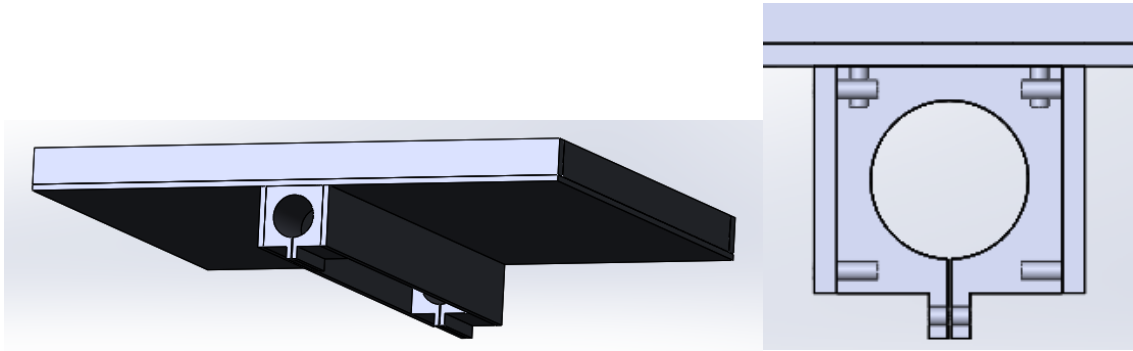


Ilustración 6.5: A la izquierda, los dos soportes de los motores con las láminas laterales. A la derecha, el perfil del soporte del motor. Nótese que se ha optado por esta geometría para poder realizar correctamente las uniones de las piezas mediante tornillos. Fuente: elaboración propia.

Después se ha creado la cubierta superior de la base, que tendrá la misma dimensión que la cubierta inferior de 460 x 380 x 5 mm. Esta cubierta también irá unida a las paredes laterales con tornillos.

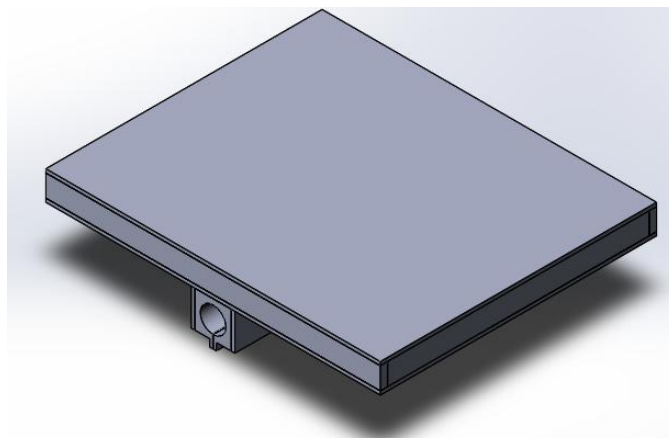


Ilustración 6.6: La cubierta superior de la base. Fuente: elaboración propia

A continuación se ha creado dos piezas de la geometría que se indica en la ilustración 6.7, con el objetivo de permitir el encaje del eje *leansteer*. Estas piezas se unirán a la cubierta superior mediante soldadura debido a su pequeño tamaño.

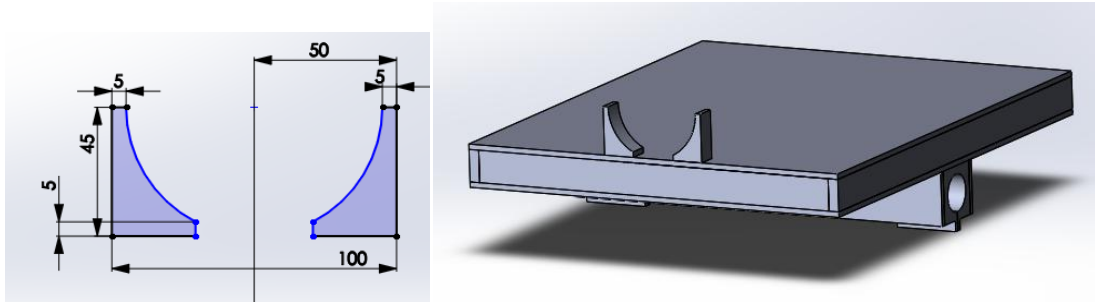


Ilustración 6.7: Estas son las dos piezas para apoyar el eje *leansteer*. Se unirán a la cubierta superior mediante soldadura. Fuente: elaboración propia

Después se ha diseñado, de forma simbólica, el sensor *leansteer*. Este se ha diseñado como una estructura cilíndrica de 60 mm de diámetro exterior y 30 mm de diámetro interior sujeta a la cubierta superior de la base, con un pivote, que se muestra en la ilustración 6.8 que puede encajar con el eje *leansteer*. Del otro extremo sale un eje delgado, de 10 mm de diámetro, y largo que encaja con dos placas verticales de 70 x 60 x 10 mm, que contienen la electrónica del sensor. El pivote tiene un corte cilíndrico de 12 mm de diámetro y 10 mm de profundidad que permitirá la unión con el eje *leansteer* mediante un tornillo.

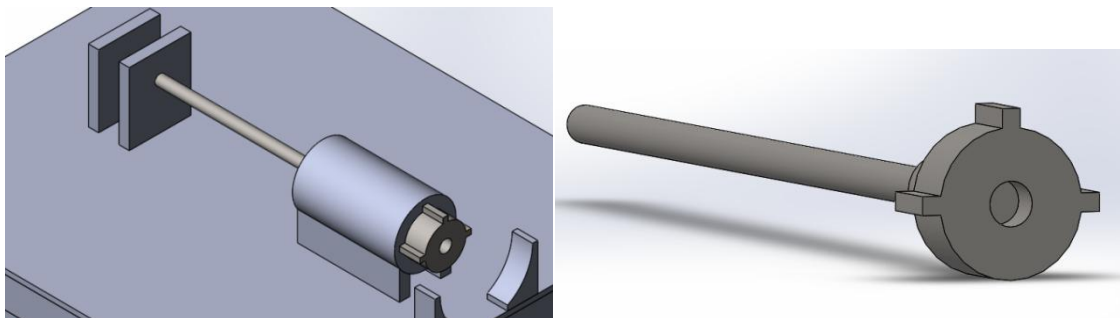


Ilustración 6.8: La representación simbólica del sensor *leansteer*. En la imagen de la derecha se puede ver el perfil del pivote que encajará con el eje *leansteer*. Fuente: elaboración propia.

En adición se ha representado un rodamiento de 30 mm de diámetro exterior y 20 mm de diámetro interior, en la estructura cilíndrica para facilitar el giro del eje del sensor con el manillar.

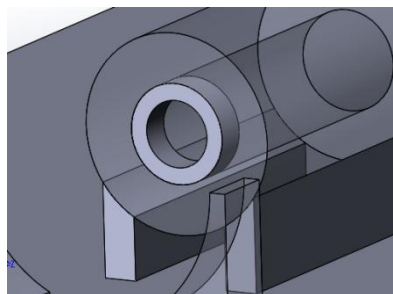


Ilustración 6.9: Rodamiento para facilitar el giro del pivote. Fuente: elaboración propia

A continuación se ha diseñado, también de forma simbólica, una entrada de corriente para cargar las baterías. Se ha decidido representar como un bloque de dimensiones de 60 x 50 por 40 mm de alto. Además, se le ha realizado un corte de 10 mm con el perfil de la ilustración 6.10 de profundidad para señalar dónde se debería conectar la fuente de alimentación.

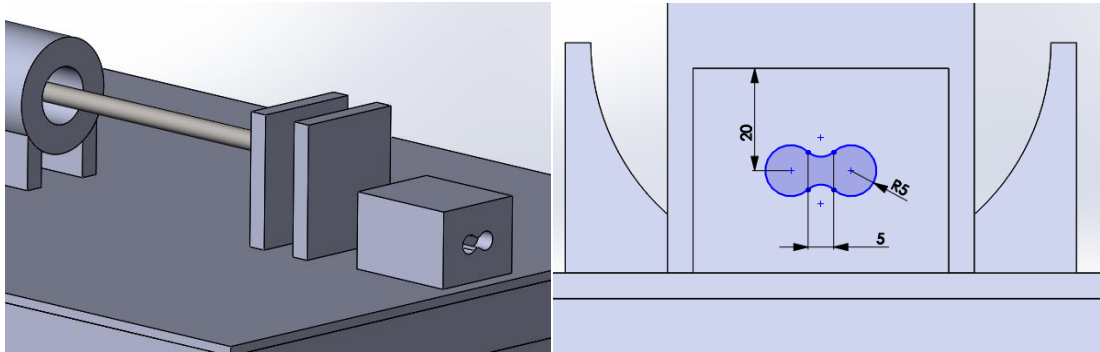


Ilustración 6.10: Entrada de corriente para alimentar las baterías. Fuente: elaboración propia

Seguidamente, se ha diseñado un recinto interior para ubicar el conjunto de sensores y el ordenador para el equilibrado del vehículo. Este recinto se ha hecho con dos láminas de 30 x 70 x 10 mm y dos de 30 x 90 x 10 mm, y se ha situado en el centro de la base.

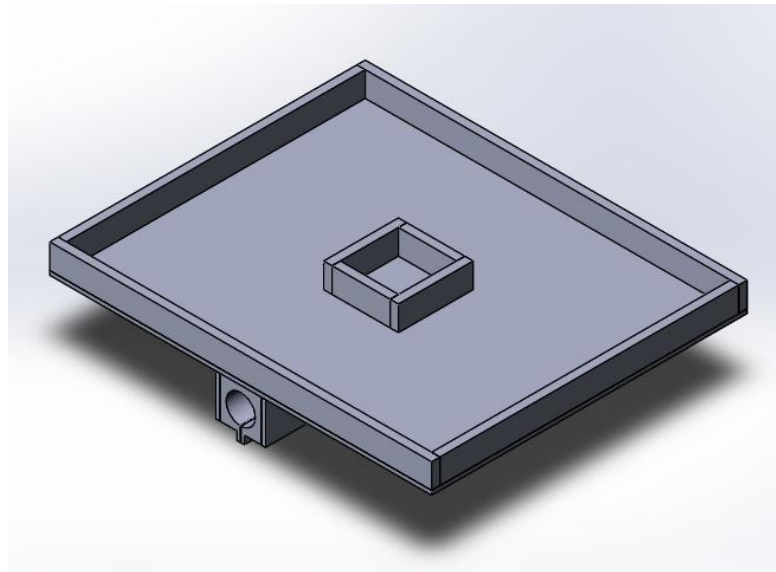


Ilustración 6.11: Recinto interior donde se almacenará el conjunto de sensores del equilibrado del vehículo. Fuente: elaboración propia

En este mismo recinto interior, para conseguir el paso de las conexiones de las placas base que controlan cada motor al ordenador, se han realizado dos cortes de 10 x 20 mm en las paredes contiguas a las placas base.

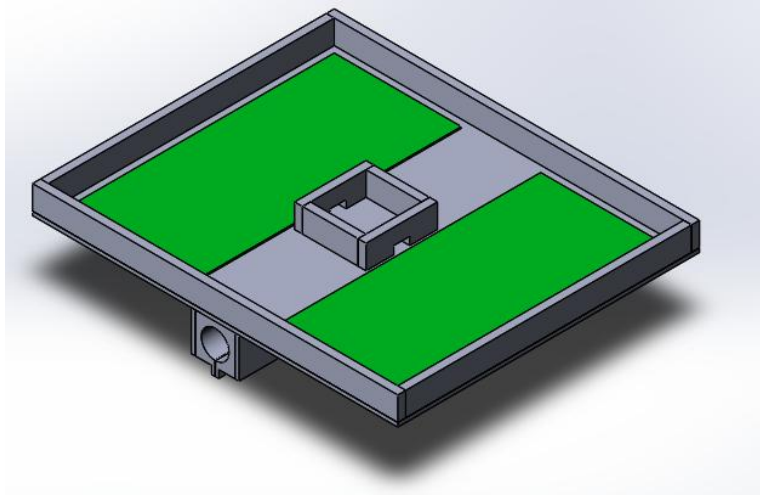
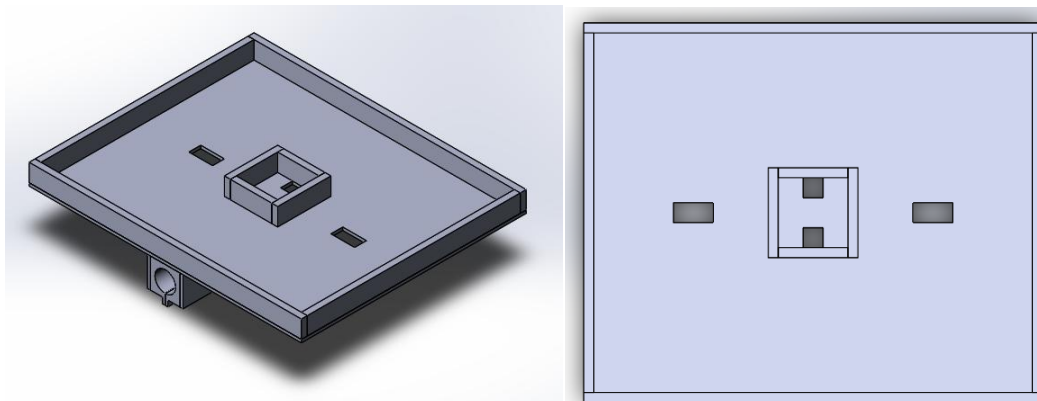


Ilustración 6.12: Recinto interior con las placas dibujadas simbólicamente para mostrar por donde se conectarían los sensores con dichas placas. Fuente: elaboración propia

También se han realizado dos cortes cuadrados de 20 x 20 mm en la cubierta inferior del interior del recinto de los sensores para que se puedan conectar a él los cables de los motores *hub* permitiendo así su control. De la misma forma, también se han hecho dos cortes de 20 x 40 mm en la cubierta inferior para conseguir unir las baterías con las placas base.



*Ilustración 6.13: Cortes cuadrados realizados para el paso de los cables de los motores *hub* al ordenador y cortes rectangulares para la conexión de las placas base y las baterías. Fuente: elaboración propia.*

A continuación y para conectar la electrónica del sensor *leansteer* con el ordenador, se ha hecho un corte de 15 x 20 mm en la cubierta superior, ubicado dicho corte encima del recinto interior.

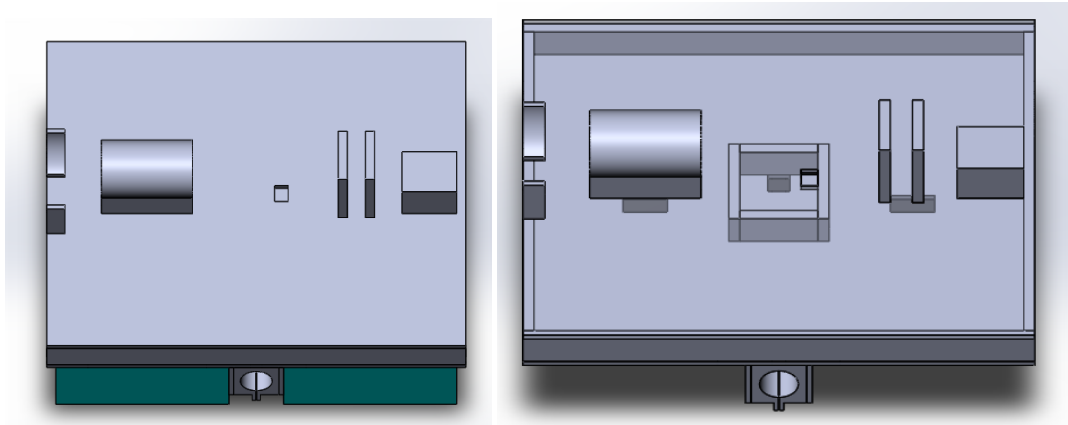


Ilustración 6.14: Corte realizado en la cubierta superior para conectar el sensor leansteer con el ordenador. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, las baterías consisten en dos bloques de dimensiones de 360 x 190 x 82 mm. Se ha decidido usar la misma batería que en un segway clásico dado que diseñar una nueva batería no introduciría ningún cambio en el funcionamiento y solo dificultaría el diseño.

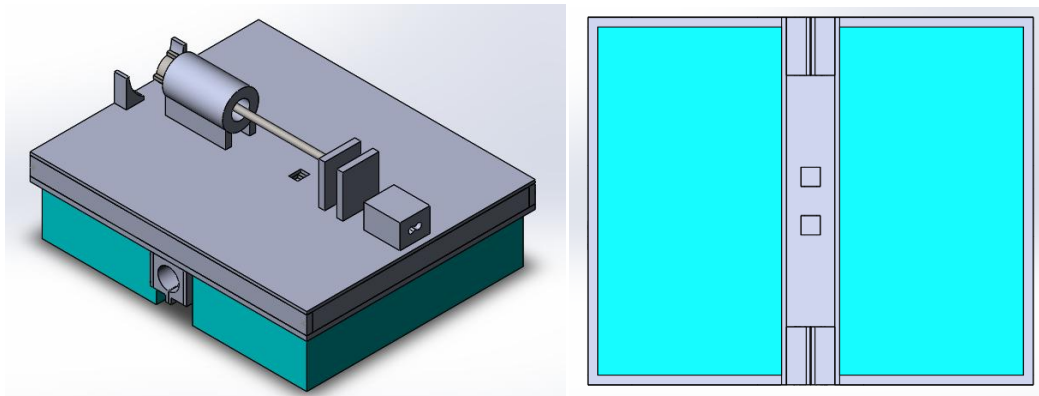


Ilustración 6.15: Base del vehículo con las baterías. Fuente: elaboración propia

6.1.2. Análisis de la base mediante el cálculo por elementos finitos

Para poder tener una confirmación más objetiva de la funcionalidad de nuestro diseño se ha decidido realizar un estudio de deformaciones y tensiones en la base del vehículo mediante el uso del cálculo de elementos finitos. Con tal fin se ha utilizado el Software para cálculo de elementos finitos ANSYS v19.0 cuya licencia académica está disponible para los estudiantes universitarios de la UPC.

Dado que la base es el elemento que recibirá mayores esfuerzos, el análisis de elementos finitos se ha centrado en confirmar que el prototipo diseñado pueda soportar la carga máxima de trabajo especificada en las especificaciones la cual ha sido estipulada en 100 kilogramos. Para el análisis de deformaciones y tensiones en la base del prototipo se ha realizado un análisis estructural estático

suponiendo las siguientes condiciones de contorno:

- A la cara superior de la base del prototipo se le aplica la fuerza externa correspondiente a los 100 kg de masa máxima repartidos uniformemente en la superficie de contacto del pie con la base.

Para calcular la presión a aplicar se ha realizado el siguiente cálculo en el cual se divide la fuerza del peso entre el total de la superficie donde se aplicará dicha fuerza:

$$P = \frac{100 \cdot 9,8}{140 \cdot 460 \cdot 2} \cdot 1000000 = 7608 \text{ Pa}$$

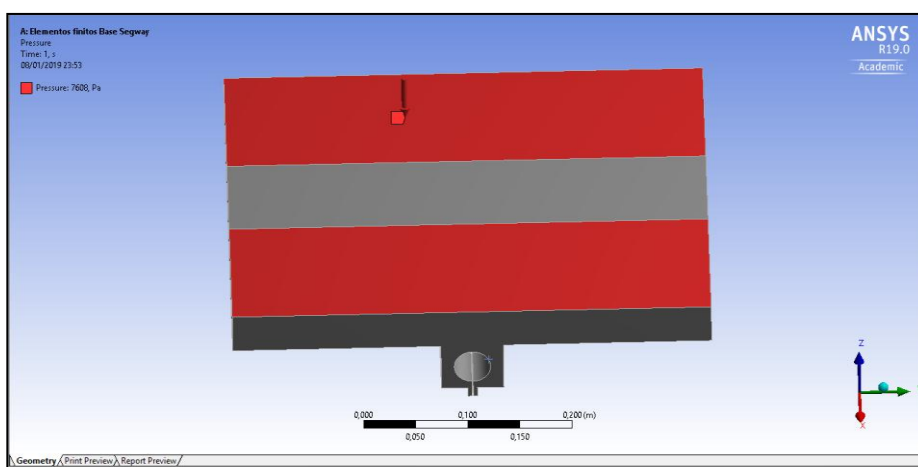


Ilustración 6.16: Condición de contorno de presión de 7608 Pa aplicados en las áreas rojas, simulando una persona de 100Kg subida a la base del vehículo. Fuente: elaboración propia

- En la circunferencia de la cara exterior del soporte del motor se han restringido los desplazamientos en las 3 direcciones ya que no interesa deformar el eje del motor el cual está hecho de acero.

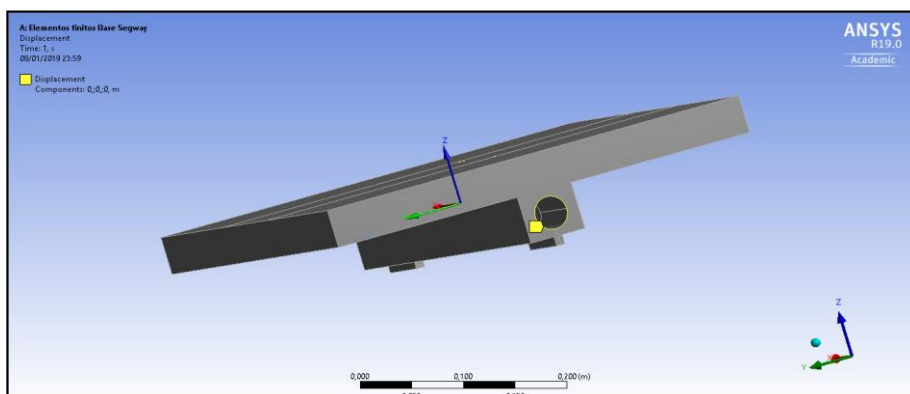


Ilustración 6.17: Restricción de desplazamiento para la circunferencia del soporte que está en contacto con el eje del motor. Fuente: elaboración propia

A continuación se procede a enumerar los resultados obtenidos del análisis.

Para el análisis de deformaciones de la base del prototipo ha salido una deformación máxima vectorial de $2,39\text{e-}5$ metros lo cual significa que en la parte delantera y trasera de la base del vehículo, se produce una deformación máxima de unos $0,0239$ mm. Esta deformación tan pequeña apunta a un diseño sobredimensionado del prototipo la cual para futuras mejoras debería optimizarse.

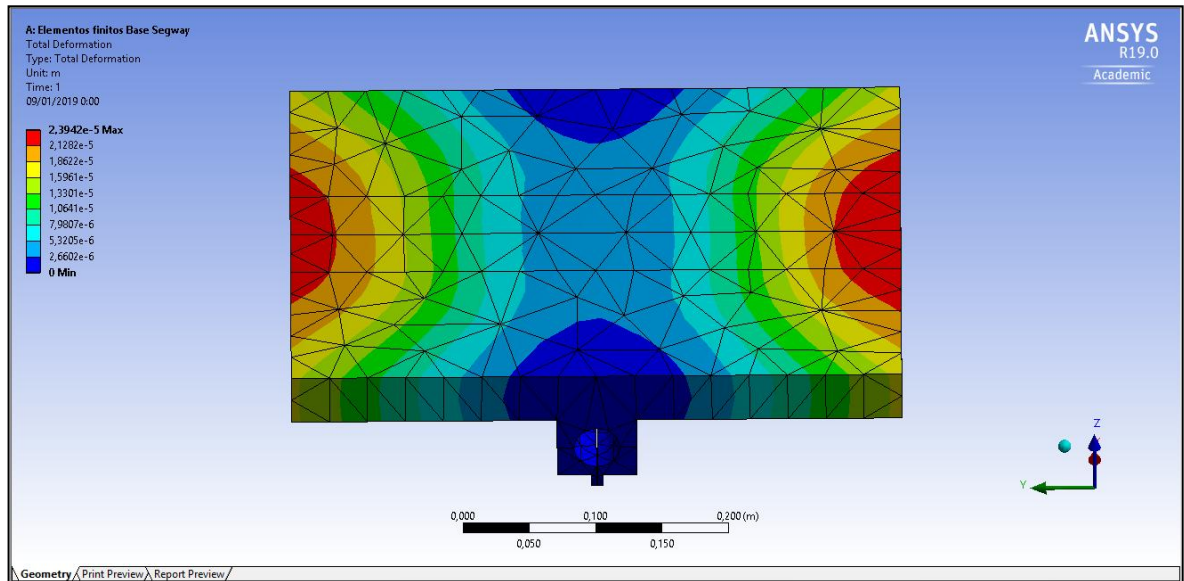


Ilustración 6.18: Mapa de deformaciones vectoriales de la base. Fuente: elaboración propia

Para el análisis de tensiones en nuestra base, como la base está diseñada para ser de aluminio, se ha calculado la tensión equivalente de Von Mises y comparado que el valor máximo de ésta no sea superior al límite elástico del aluminio ($2,8\text{e}+8$ Pa). Se han obtenido una tensión equivalente máxima de $2,507\text{e}+6$ Pa la cual es inferior al límite elástico del aluminio.

Estos valores nos confirman el sobredimensionamiento de la base del prototipo si bien es cierto que el análisis se ha hecho en condiciones de estática sin tener en cuenta los golpes que pueda recibir el vehículo en condiciones de funcionamiento por la ciudad así como caídas. Así nos aseguramos que el prototipo no se vaya a romper debido a las tensiones. Para un mejor análisis se debería proceder a realizar pruebas de caídas del vehículo al bajar desniveles como pueden ser bordillos o escaleras.

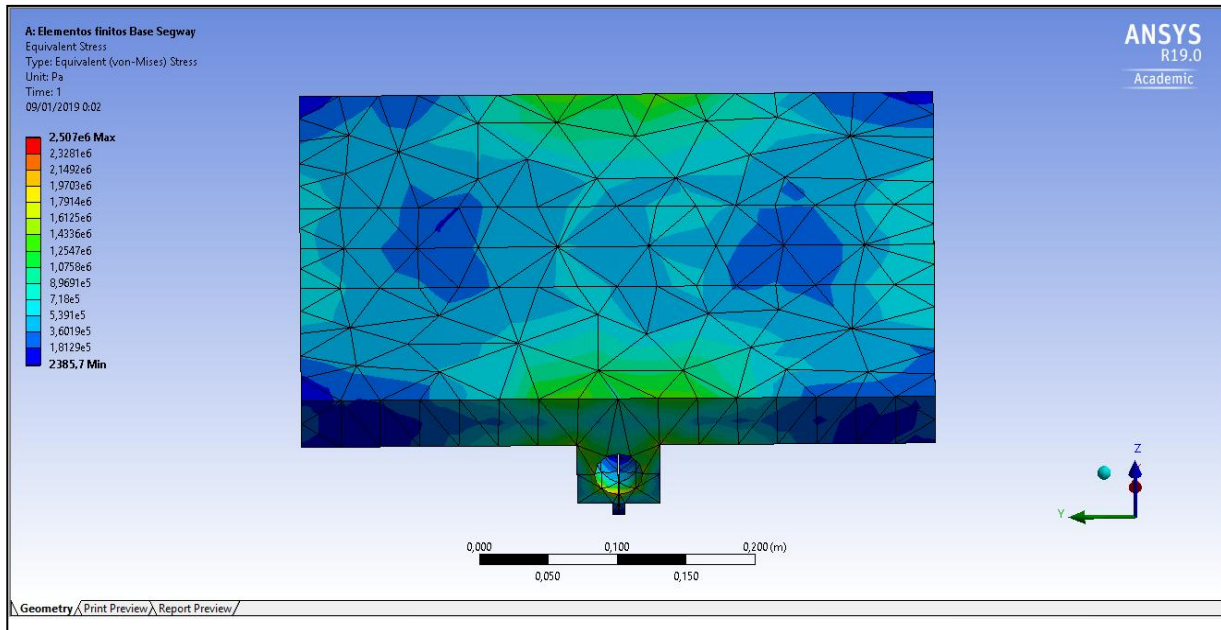


Ilustración 6.19: Mapa de tensiones equivalentes de Von Mises para la base del vehículo. Fuente: elaboración propia.

6.1.3. Uniones para la base del prototipo

Para unir los distintos elementos que conforman la base se han usado tornillos de 4 mm de diámetro y tres longitudes de 14, 20 y 25 mm en función de las partes a unir. La unión mediante tornillos se ha usado para unir las láminas de aluminio entre ellas, las baterías y los soportes de los motores a la cubierta inferior de la base, la estructura de soporte del sensor *leansteer* y la entrada de corriente a la cubierta superior de la base.

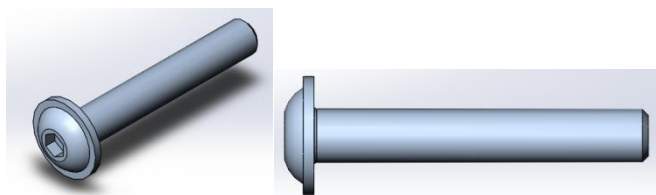


Ilustración 6.20: Tornillos empleados para las uniones. Fuente: Traceparts

Únicamente se ha considerado usar la unión mediante soldadura para unir las piezas de la ilustración 6.7, en la que el uso de tornillos es imposible por la geometría y posición de la parte.

6.1.4. La plataforma para los pies

La plataforma para los pies consiste en dos plataformas rectangulares de dimensiones 460 x 140 x 10 mm. Estas están acopladas a la parte superior del módulo central, con tres de sus caras laterales coplanarias a las caras laterales del vehículo. Estas medidas que se han tomado para las plataformas garantizan que el pie humano pueda situarse perfectamente. Además, estas plataformas tendrán unos salientes de dimensiones 20 x 120 x 1 mm, para evitar que los pies del usuario se deslicen. Estas plataformas estarán unidas al prototipo mediante cola industrial.

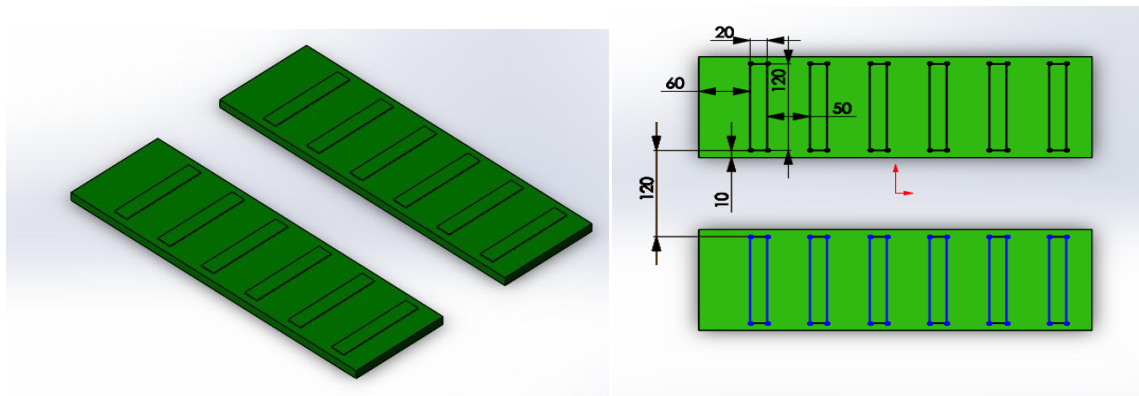


Ilustración 6.21: Plataformas para los pies. Fuente: elaboración propia

La cubierta del sensor *leansteer* consiste en una perfil de 10 mm de grosor y extendido hasta llegar a la entrada de corriente del vehículo. Este perfil consiste en el siguiente croquis con las siguientes dimensiones, en milímetros:

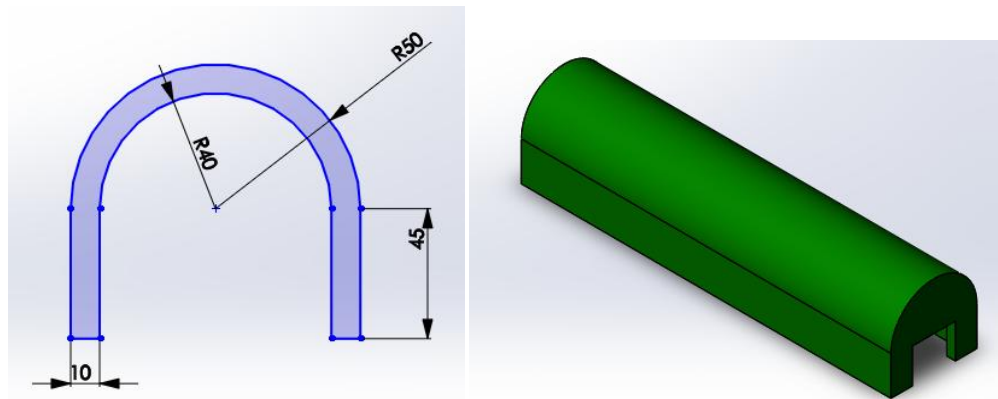


Ilustración 6.22: A la izquierda se muestra el perfil usado para la cubierta del sensor *leansteer*. Fuente: elaboración propia

Al llegar al extremo de la entrada de corriente, hay una pared para cerrar la cubierta por la parte de la entrada de corriente y evitar que agentes externos puedan afectar al sensor *leansteer*. Esta pared tiene un grosor de 10 mm.

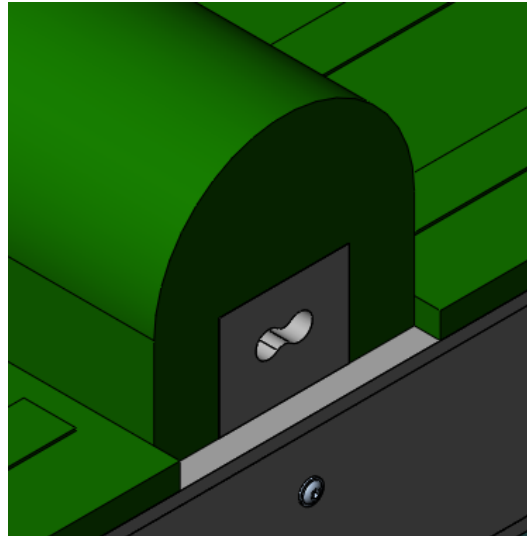


Ilustración 6.23: En el extremo de la entrada de corriente se ha tapado con una pared de 10 mm de grueso el espacio restante entre el perfil de la fuente y de la cobertura.

Finalmente se han realizado, en la cara inferior de la plataforma para pies 8 agujeros de 9 mm de diámetro y 2,5 mm de profundidad para alojar las cabezas de los tornillos, de la cubierta superior de la base al acoplar la plataforma para pies con la cubierta superior:

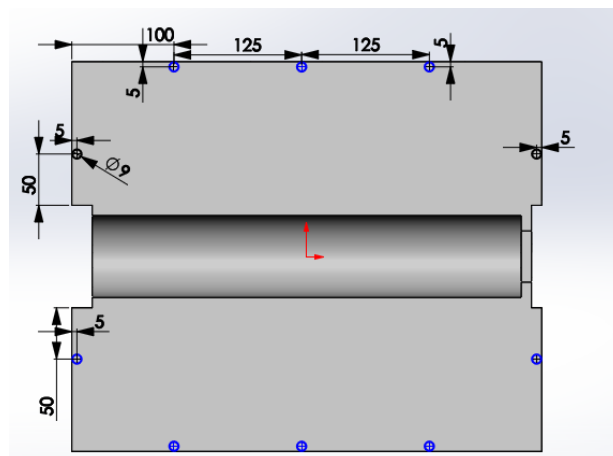


Ilustración 6.24: Cortes realizados en la cara inferior de las plataformas de los pies para alojar las cabezas de los tornillos de la cubierta superior de la base.

6.1.5. El manillar

El manillar es el módulo que permite al usuario controlar la dirección del vehículo. Está formado por el eje *leansteer* y el mango horizontal. Para su diseño, se ha considerado que el eje debe encajar perfectamente con la base mediante un pivote unido al sensor *leansteer* que permita determinar la dirección. A su vez, debe estar a una altura cómoda para el usuario de forma que pueda usarlo estando de pie sin doblar el cuerpo.

Primeramente se ha diseñado el eje, el cual se ha representado como un perfil extruido siguiendo un recorrido especificado. Se ha decidido que el material de este eje sea de aluminio 6061.

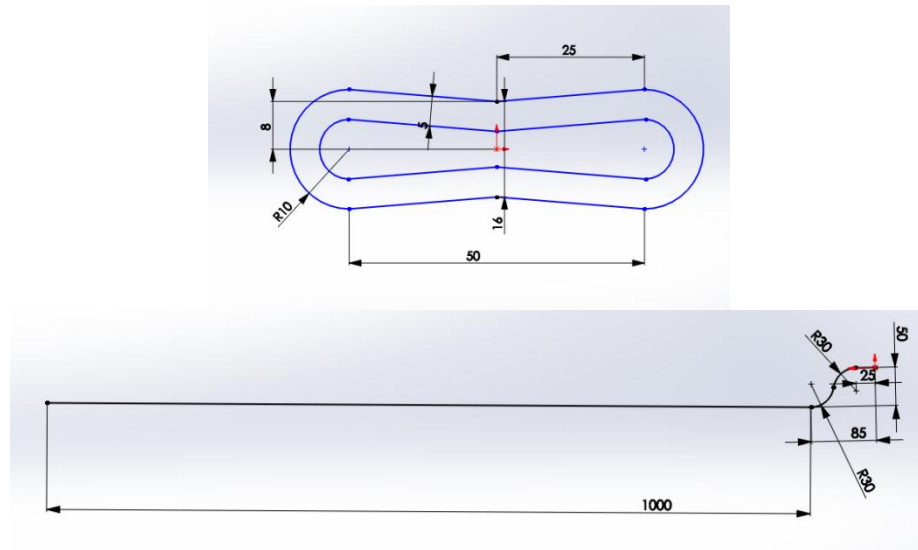


Ilustración 6.25: Arriba, el perfil del eje leansteer que se va a extruir. Abajo, el recorrido del perfil para conformar el eje leansteer

Para la realización del mango para las manos, se ha realizado un croquis de una corona circular en un plano que corta longitudinalmente el cuadro vertical simétricamente y se ha realizado una extrusión de dicho croquis en ambas direcciones de 200 mm con 0,5° de ángulo de salida. Este soporte irá unido mediante pegamento al cuadro vertical. El mango estará fabricado con un tipo de plástico, como por ejemplo caucho.

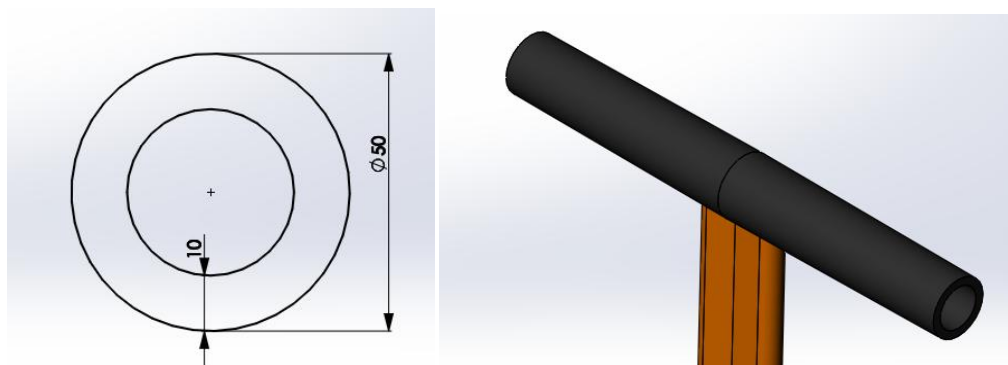


Ilustración 6.26: Perfil del mango del manillar. Fuente: elaboración propia

A continuación, en el otro extremo del eje *leansteer* se ha diseñado el encaje con la base. Este consiste en el siguiente perfil extruido 20 mm. Seguidamente en dicha pieza, se ha realizado otra estructura cilíndrica de 40 mm de longitud y 70 mm de diámetro de forma que encaje entre la base y la cubierta del sensor *leansteer*. Después se ha realizado un corte usado la misma forma que tiene el pivote del sensor *leansteer*. Todo seguido se le ha añadido un rodamiento para facilitar el giro del manillar cuando esté encajado en la base. Finalmente se le ha practicado un corte cilíndrico de 12 mm de diámetro para conseguir unirlo sólidamente con el pivote mediante

un tornillo. Este encaje se ha unido al resto del eje mediante soldadura y también está fabricado de aluminio 6061.

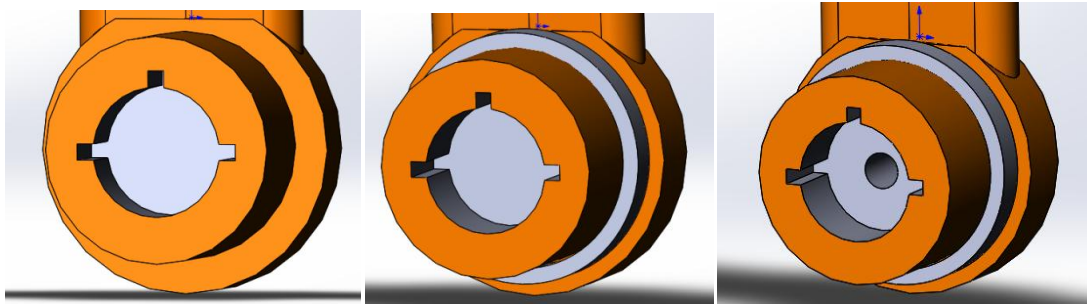


Ilustración 6.27: Encaje del eje leansteer con la base del vehículo. Fuente: elaboración propia

6.1.6. El motor *hub*

Este módulo consiste en un motor que está acoplado en el interior de la rueda, y no externo a ella como ocurre en el segway clásico. Dado que se ha decidido escoger un motor *hub* del mercado que se adaptase a nuestras especificaciones, se ha decidido representar el motor mediante la información proporcionada por sus fabricantes y añadirle los neumáticos. El motor *hub* escogido para la propulsión de nuestro prototipo ha sido el motor QS Motor *hub* Single Shaft 205 de 10 pulgadas de diámetro.

Para poder representar el motor a escala real en SolidWorks y poder obtener mediciones aproximadas como por ejemplo el momento de inercia de dicha pieza se ha solicitado información al fabricante obteniéndose así unos planos resumidos conjuntamente con una ficha técnica del motor escogido. Un problema que ha surgido al intentar diseñar el perfil de revolución del motor *hub* escogido ha sido la falta de cotas definidas por el fabricante en el plano que se nos proporcionó. Con el fin de obtener una recreación del motor lo más ajustada a la realidad se ha procedido a crear el perfil del motor con todas las cotas definidas en el plano y en las cotas que no se podían obtener mediante sustitución o adición de cotas se ha hecho una estimación a vista en base al plano proporcionado por el fabricante.

A cada uno de estos tornillos se les ha aplicado dos relaciones de posición en Solidworks para situarlo dentro de la unión. Para ello, se ha aplicado una relación de circunferencia concéntrica entre la circunferencia del agujero y la del sombrero, y también una relación de coincidencia entre la cara inferior del sombrero y la cara de la parte del prototipo en la que va a quedar el sombrero.

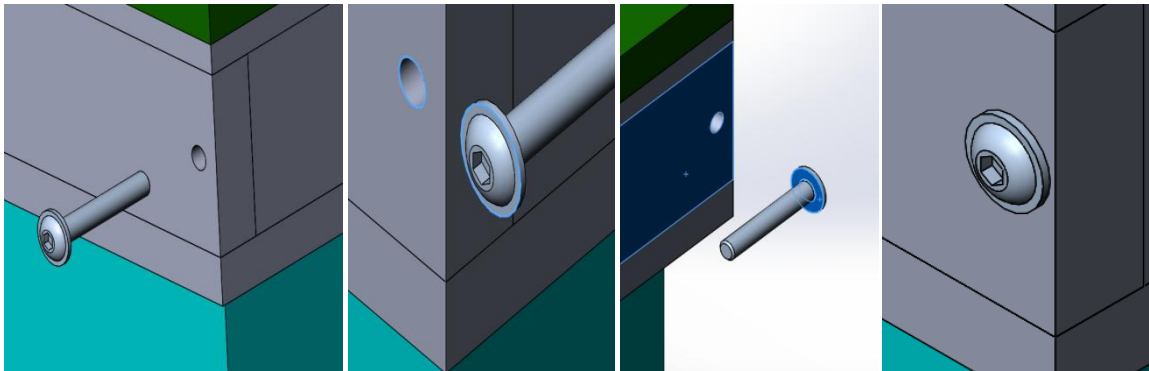


Ilustración 6.29: Procedimiento empleado en el ensamblaje para unir las piezas mediante los tornillos en SolidWorks. Fuente: elaboración propia.

Ahora, una vez introducidos todos los tornillos de la base mediante dichas relaciones, se han ensamblado el resto de partes.

Primeramente, se ha unido el soporte para pies a la cubierta superior de la base, haciendo que las paredes laterales de la cubierta para pies y de la base estén en el mismo plano, simulando que están unidos mediante cola o resina.

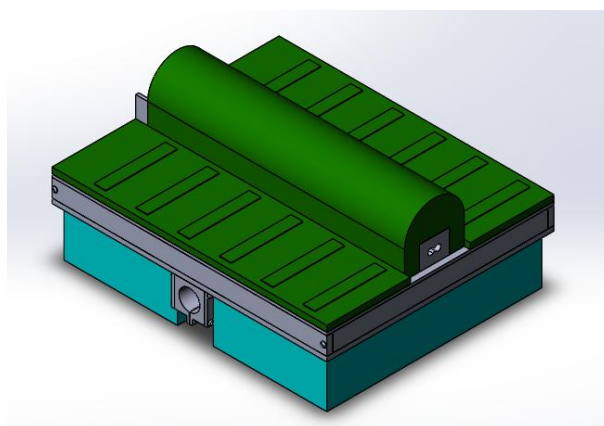


Ilustración 6.30: Soporte para pies (color verde) unido a la base del vehículo. Fuente: elaboración propia

Seguidamente, se han unido los dos motores *hub* a la base mediante los dos soportes de los motores. Para ello, se ha aplicado únicamente la relación de coincidencia entre la circunferencia de la entrada del soporte del motor y una circunferencia del eje del motor, como se muestra en la siguiente imagen.

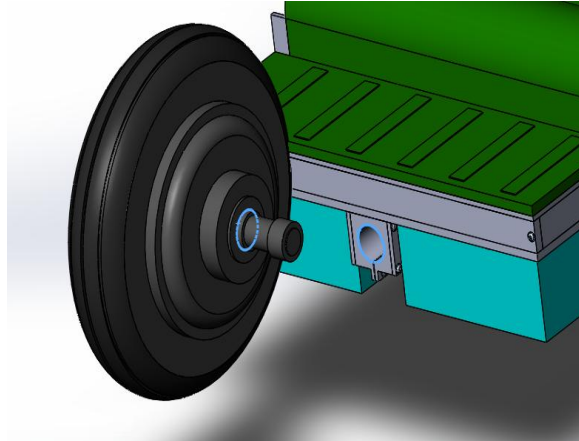


Ilustración 6.31: Procedimiento empleado para unir el motor hub con la base del vehículo. Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, se procede a encajar el manillar con la base. Para ello se aplican dos relaciones en el encaje: relación de coincidencia de dos puntos, uno del manillar y el otro del encaje, y luego la coincidencia de superficies que se muestra en la siguiente imagen:

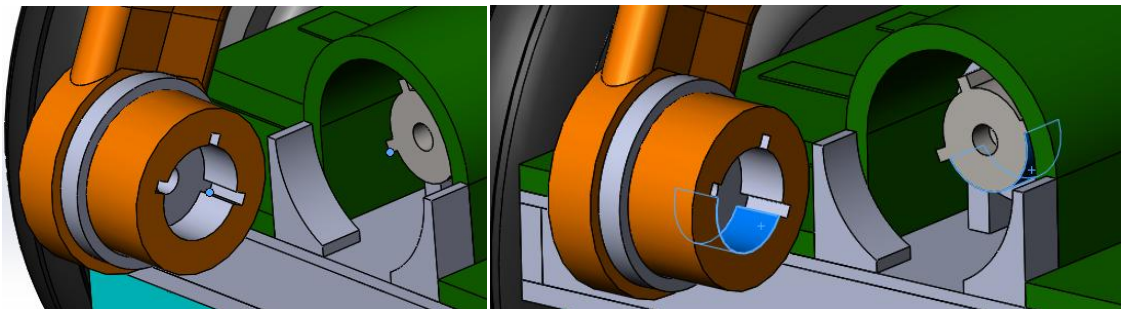


Ilustración 6.32: Procedimiento para unir el manillar con la base del vehículo. Fuente: elaboración propia.

De este modo, el manillar girará solidario al pivote. También se ha establecido una restricción de movilidad del manillar respecto la horizontal, para que pueda moverse entre 52° y 127° , de modo que no atraviese la propia base. Finalmente, se han unido el manillar y la base añadiendo un tornillo de 12 mm de diámetro y 50 mm de profundidad, y aplicando las mismas relaciones de coincidencia y concéntrica que las que se han aplicado para la unión de los elementos de la base del prototipo.

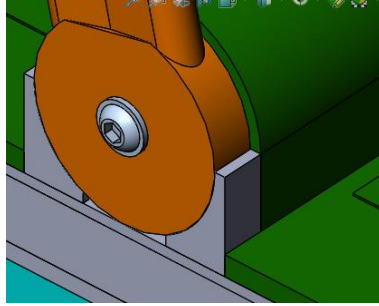


Ilustración 6.33: Unión del manillar y la base del vehículo mediante un tornillo. Fuente: elaboración propia

De este modo, finalmente ya está diseñado el prototipo.

7. Planificación

Este proyecto se empieza a desarrollar a inicios de setiembre del 2018 con el inicio del curso académico. La primera gran fase del proyecto se basa en estudiar el mercado actual de los vehículos de transporte autoequilibrados así como toda la tecnología necesaria para comprender su funcionamiento. A continuación se procede a la determinación el modelo matemático del vehículo para determinar las ecuaciones dinámicas y cinemáticas a introducir en el Excel para poder terminar de entender y visualizar su comportamiento. Paralelamente, para poder proceder al inicio del diseño del prototipo se definen las especificaciones basándose en las prestaciones de los modelos actuales. Una vez determinadas las prestaciones se proceder a investigar sobre los motores *hub* para poder elegir un motor que sea compatible con las especificaciones del vehículo.

En paralelo a la búsqueda de motores compatibles y el estudio de la técnica del rebobinado del motor, se empieza a realizar el diseño del prototipo siendo este un proceso de continuos cambios y mejoras hasta obtener el diseño definitivo. Una vez encontradas las ecuaciones del modelo matemático se procede a crear la simulación del vehículo así como determinar las constantes del controlador PID implementado. Finalmente se procede a hacer un análisis de deformaciones y tensiones con elementos finitos y se calcula el consumo y autonomía del prototipo concluyéndose así el proyecto el día 2 de enero de 2019.

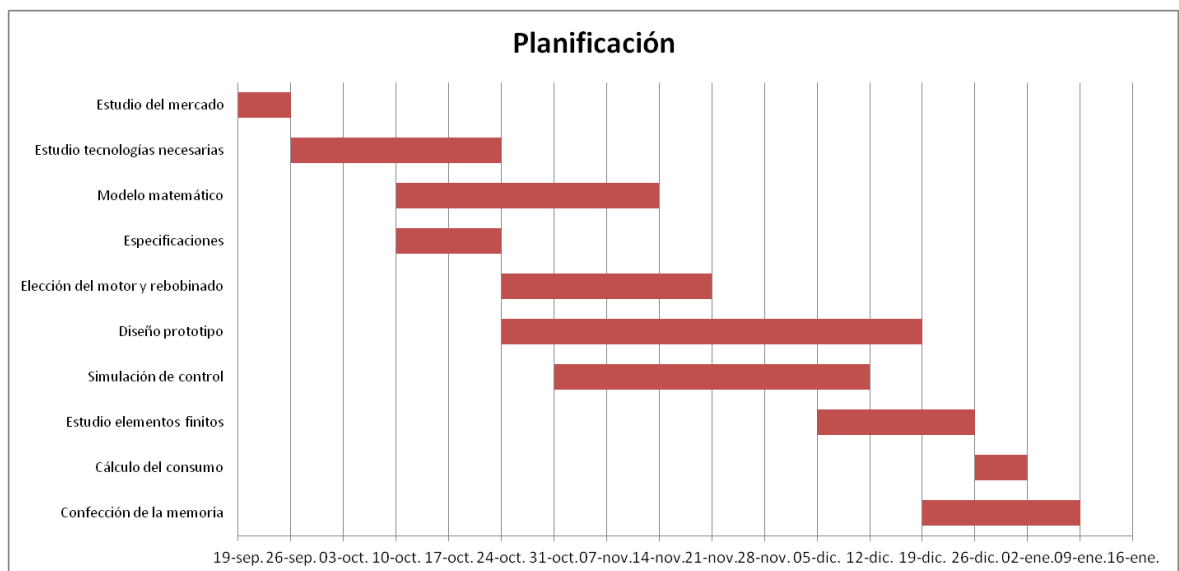


Ilustración 7.1: Diagrama de Gantt del Proyecto. Fuente: elaboración propia.

8. Impacto ambiental

Este proyecto ha consistido en el diseño y la simulación de un prototipo de vehículo de transporte autobalanceado. Sin embargo, no se ha construido físicamente dicho prototipo, por lo que el impacto ambiental que tiene este proyecto es nulo.

Si el prototipo se *hubiera* fabricado, el impacto ambiental sería más notable. Primeramente las láminas de aluminio usadas para la construcción de la base son totalmente reciclables por lo que no contaminaran el medio ambiente, pero sí el gasto de energía eléctrica usado en la producción de dichas láminas con las dimensiones especificadas y la mecanización de los agujeros para la unión de los elementos. También estarían asociados el impacto ambiental al fabricar el motor *hub*, la batería y la electrónica, cuyos procesos industriales de fabricación incluyen etapas contaminantes.

En cuanto al uso de los componentes electrónicos, los circuitos integrados tienen un impacto ecológico negativo para el medio ambiente, llegando incluso a superar al de la fabricación de un automóvil. Además, dichos circuitos integrados son difícilmente reciclables.

El uso de los motores *hub* también tiene un impacto ambiental negativo para el medio ambiente, pues aunque sus partes metálicas puedan ser recicladas, su electrónica, como ya se ha comentado, tiene una mayor dificultad de reciclaje. Además, el neumático y las demás partes de plástico del motor, como el aislante del cableado, pueden durar mucho tiempo antes de que se descompongan, por lo que pueden afectar negativamente al medioambiente.

El soporte para pies, que en su defecto está pensado para fabricar de plástico, también tendría un impacto ambiental significativo por el mismo motivo anterior.

El eje *leansteer del manillar*, al estar fabricado de aluminio, también es reciclable por lo que no tendría impacto ambiental significativo. Sin embargo, el mango del manillar para que el usuario pueda agarrarse está fabricado con plástico después de finalizar su vida útil por lo que surgiría el mismo problema que con los otros elementos de plástico del prototipo.

El uso de la batería es especialmente contaminante si se deposita en el medio ambiente, debido a que se descompone ante agentes externos como la lluvia o el calor, provocando que libere metales como el litio, el cual es muy tóxico para el medio ambiente. Si dichos metales entran en contacto con el agua pueden contaminar un gran volumen de ésta aunque la cantidad de metal que se haya depositado sea mínima. Es por esto que las baterías deben eliminarse mediante un proceso especial de eliminación en un centro de tratamiento de residuos.

9. Presupuesto

Dado que en este proyecto únicamente se ha realizado el estudio y no se ha llegado a construir el prototipo, el presupuesto se definirá en base a las horas de estudio remuneradas y a los costes de licencias del software utilizado. En la siguiente tabla se mostrará desglosado el presupuesto:

Número de integrantes del proyecto: 2

Actividad	Precio unitario(€/h)	Horas dedicadas por ingeniero del proyecto	Coste (€) incluyendo los 2 integrantes
Estudio del mercado actual	20	10	400
Estudio de las tecnologías	20	25	1000
Estudio del modelo matemático	100	70	14000
Simulación mediante Excel	35	90	6300
Diseño del prototipo mediante Solidworks	30	110	6600
Simulación mediante elementos finitos	100	20	4000
Redacción de la memoria	20	40	1600
Licencia Microsoft Office pack 2007	-	-	76
Licencia SolidWorks 2018 student version	-	-	0
Licencia ANSYS 19 student version	-	-	0
Coste total del proyecto	-	-	33976

Tabla 9.1 Presupuesto elaborado de este proyecto. Fuente: elaboración propia.

El coste total de este proyecto asciende a 33976 €, y el total de horas dedicadas a su realización ha sido de 730 horas (lo que equivale a unas 365 horas por parte de cada uno de los integrantes del proyecto).

10. Conclusiones

Una vez finalizado este proyecto se puede afirmar que se han alcanzado los objetivos especificados al inicio. Se ha conseguido diseñar un prototipo que pueda ofrecer unas prestaciones similares a las de los segway clásicos del mercado. En la siguiente tabla se comparan las especificaciones fijadas previas al diseño y las obtenidas después de la realización del diseño de nuestro prototipo:

	Especificaciones esperadas	Prototipo diseñado
Máx. Velocidad	30 km/h	30 km/h
Masa neta	55 kg	70 kg
Energía de la batería	382 Wh	382 Wh
Masa máxima soportada	100 Kg	100 kg
Potencia de salida	1000Wx2	1000Wx2
Autonomía	30 Km	27,55 km
Tiempo de carga máximo	12 horas	12 horas

Tabla 10.1: Tabla comparativa de las especificaciones esperadas al inicio del diseño con las obtenidas al final de éste..

Dado que las baterías usadas y el motor *hub* son piezas que se han decidido utilizar ya fabricadas, las especificaciones referentes a ellos no han cambiado durante la realización del diseño.

Para la velocidad máxima se ha conseguido cumplir con la especificación esperada. De hecho, en la simulación se llegó a ver que el prototipo podía operar a velocidades incluso mayores, pero se decidió limitar la velocidad máxima a 30 km/h para evitar que el prototipo pudiera ser peligroso.

La masa máxima soportada por el prototipo se ha decidido mantener en 100 kg. En este proyecto el diseño no ha sido optimizado en cuanto a peso y resistencia de esfuerzos debido a que lo que interesaba era analizar su funcionamiento. Durante el análisis por elementos finitos de la base, se ha visto que la tensión máxima es muy inferior a la tensión del límite elástico del aluminio, por lo que el prototipo está sobredimensionado y podría soportar cargas mayores. Sin embargo, dado que el principal interés del diseño era entender el funcionamiento de un vehículo autobalanceado, no se ha realizado ninguna optimización de diseño y por ello se ha fijado la masa máxima.

Referente a la masa obtenida del prototipo, ésta ha sido mayor a la esperada, llegando a pesar 70 kg debido a que su diseño, tal y como ya se ha comentado, no ha sido optimizado. La autonomía también se ha visto afectada debido a ese factor, por lo que ha resultado ser menor a la esperada. El mayor peso del diseño ha hecho aumentar el consumo teórico respecto a un vehículo autobalanceado típico. En un futuro se debería optimizar el diseño del vehículo.

En cuanto a su simulación, se han obtenido los resultados esperados pudiéndose diseñar un controlador PID capaz de estabilizar el vehículo adquiriendo una aceleración en el sentido de la inclinación. La simulación ha sido clave para poder entender el funcionamiento de este tipo de vehículos así como el modelo matemático y las ecuaciones dinámicas y cinemáticas que modelan este vehículo.

Por otro lado, la inclusión del motor *hub* ha sido un acierto, dado que ofrece la misma funcionalidad que el conjunto motor, transmisión y rueda, y a la vez simplifica su diseño, debido a la reducción de partes en el conjunto. También se consigue un ahorro en espacio que puede servir para una posible optimización en el diseño.

Finalmente, consideramos que este proyecto ha resultado ser muy enriquecedor para ambos integrantes debido a que nos ha ayudado a comprender mejor este tipo de vehículos y determinar que su funcionamiento es mucho más simple de lo que puede aparentar cuando se ven por primera vez. A su vez, nos ha servido para aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo del grado y a mejorarlos, como por ejemplo nuestro dominio en SolidWorks, ANSYS y Excel. Nos ha fascinado la facilidad con la que puede simularse un controlador PID mediante una hoja de cálculo y obtener buenos resultados de dicha simulación. También, aunque nos haya resultado difícil, hemos podido adquirir nociones básicas en el ámbito del diseño de productos a nivel industrial, más concretamente en la elaboración de prototipos. Todos ellos, son conocimientos que sin duda esperamos que sean de utilidad en nuestro futuro profesional.

11. Futuras mejoras e implementaciones

En este apartado se reflejarán las posibles futuras mejoras que pueden implementarse en el diseño realizado en este proyecto.

- Estudio ampliado considerando las fricciones del motor, las fricciones aerodinámicas y la resistencia a la rodadura.
- Elaboración de un controlador que incluya dichas fricciones y posibles perturbaciones como cambios bruscos de terreno.
- Ampliación del estudio al equilibrado del vehículo a más de una dirección durante la realización de giros en marcha y giros sobre sí mismo.
- Ampliación de la simulación del vehículo incorporando la situación de subida de una rampa.
- Optimización del diseño del vehículo evitando su sobredimensionamiento.
- Optimización del eje *leansteer* para que pueda regularse la altura del manillar.
- Inclusión en el diseño el sistema de alumbrado, con faros rojos por detrás y faros blancos por delante.
- Adición de una pequeña pantalla en el mango del manillar que permita dar información al usuario sobre su velocidad, estado de carga de las baterías o posibles averías.
- Adición de un freno de emergencia que permita al usuario detenerse con facilidad en caso de peligro.
- Inclusión de un dispositivo tipo claxon para advertir a los otros usuarios de la vía pública en situaciones de peligro mediante señales acústicas.

Se espera realizar dichas implementaciones en un proyecto futuro, como podría ser el trabajo final de Máster, que también implique su construcción.

12. Agradecimientos

Queremos agradecer a todas las personas que nos han ayudado en la realización de este trabajo, tanto por el apoyo que nos han dado como por la facilitación de información y conocimiento.

En primer lugar y muy particularmente queremos expresar nuestro agradecimiento a nuestro tutor, el doctor Emilio Angulo Navarro, por la dirección académica de este proyecto y por la ayuda y orientación que nos ha proporcionado siempre que lo hemos precisado.

A nuestras familias, por su apoyo personal en todo momento.

Finalmente, agradecer a la Universitat Politècnica de Catalunya el suministro de licencias de estudiante de forma gratuita para los programas empleados en la simulación y en el diseño del prototipo.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] SEGWAY INC. *Manual del usuario*. [http://www.segway.com/media/1736/segment_spanish.pdf, 20 de setiembre de 2018]

- [2] HARRIS, Tom. *How Segways Work*. [<https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/ginger1.htm>, 21 de setiembre de 2018]

- [3] SEGWAY NEW ZEALAND. *Inside a segway gearbox*. [<https://segwaynz.wordpress.com/2012/08/21/inside-a-segway-pt-gearbox-and-all-about-servicing-elastomers-couplings/>, 3 de octubre de 2018]

- [4] WOODFORD, Chris. *Explain that stuff: Hub motor*. [<https://www.explainthatstuff.com/hubmotors.html>, 3 de octubre de 2018]

- [5] BATERÍA PLUS. *Celdas de litio para baterías*. [<https://bateriaplus.com/celdas-de-litio-para-baterias>, 3 de octubre de 2018]

- [6] SEGWAY ESPAÑA, *¿Cómo funciona un segway?* [<https://www.youtube.com/watch?v=xvcpylhDfrE&feature=youtu.be>, 5 de octubre de 2018]

- [7] SEGWAY ESPAÑA, *¿Como gira un segway?* [<https://www.youtube.com/watch?v=s4Guaxgzxps&feature=youtu.be>, 5 de octubre de 2018]

- [8] QS MOTOR. *10 inch 205 model single shaft hub motor*. [<http://www.qs-motor.com/product/10inch-205-model-single-shaft-hub-motor-1000w-3000w/>], 24 de octubre de 2018]
- [9] RAMÍREZ-GONZÁLEZ, Luis, GARCÍA-MARTÍNEZ, José, SIORDIA-VÁSQUEZ, Xochitl y GARCIA-RAMOS, Roman. *Euler Lagrange en el modelado y control de un péndulo invertido sobre un carro*. Revista de Ingeniería Eléctrica, Vol.1 No.3, Diciembre de 2017, pág. 1-8. ERCOFAN-P.
- [10] MONTOYA GIRALDO, Oscar Danilo, VALENZUELA HERNÁNDEZ, Juan Guillermo y GIRALDO BUITRAGO, Didier. *Balanceo y Estabilización del Péndulo Invertido Empleando Redes Neuronales Artificiales y un Regulador Lineal Óptimo con Criterio Cuadrático (LQR)*. Scientia et Technica Año XVIII, Vol. 18, No 1, Abril de 2013. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [11] KYLE, Ch.R. *The mechanics and aerodynamics of cycling*. Medical and Scientific aspects of cycling, pág 235-251. Human Kinetics. Champaign Illinois. 1988.
- [12] BRAIN, Marshall. *How Lithium-ion Batteries Work*. [<https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm>], 26 de setiembre]
- [13] PETER SOFTAK. *Repair Segway Battery Pack 72V 5 6A 18650 li ion*. [<https://www.youtube.com/watch?v=B7T9SISua8s>], 17 de octubre de 2018]

Bibliografía complementaria

- [14] SEGWAY .Inc *Segway*. [<http://es-es.segway.com/>], 27 de setiembre de 2018]
- [15] SEGWAY CUENCA, *Catálogo Segway*. [http://www.segwaycuenca.es/catalogo_segway.pdf], 27 de setiembre de 2018]



- [16] HOOBOARD, *Hooboard main page* [<https://www.hooboard.com/hooboard-first-all-terrain-smart-self-balance-scooter-board.html>, 30 setiembre de 2018]
- [17] Mr. HOVER, *Segway Ninebot One S1, S2, C, C+, E, and E+ reviews & comparisons* [<https://hoverboardselectric.com/best-one-wheel-electric-unicycle-scooters/ninebot-one-reviews/>, 30 setiembre de 2018]
- [18] CENTRAL DE REPUESTOS, *Baterías para segway* [<https://www.centralde.com/productos/segway/bateria-segway>, 4 de noviembre de 2018]
- [19] SEGWAY Inc. *Seguridad en el segway PT.* [<https://docs.gestionaweb.cat/1362/seguridad-segway-pt-2.pdf>, 10 de diciembre de 2018]
- [20] ELECTRÓNICA PRÁCTICA PASO A PASO. *El Potenciómetro - Que es y Cómo se Conecta.* [<https://www.youtube.com/watch?v=sBGNyhlorfo>, 14 de diciembre de 2018]
- [21] INDUSTRIAS ELECTRICAS HERGOROS, S.L. *¿Por qué es necesario el rebobinado de Motores?* [<http://www.hergoros.com/necesario-rebobinado-motores/>, 14 de noviembre]

